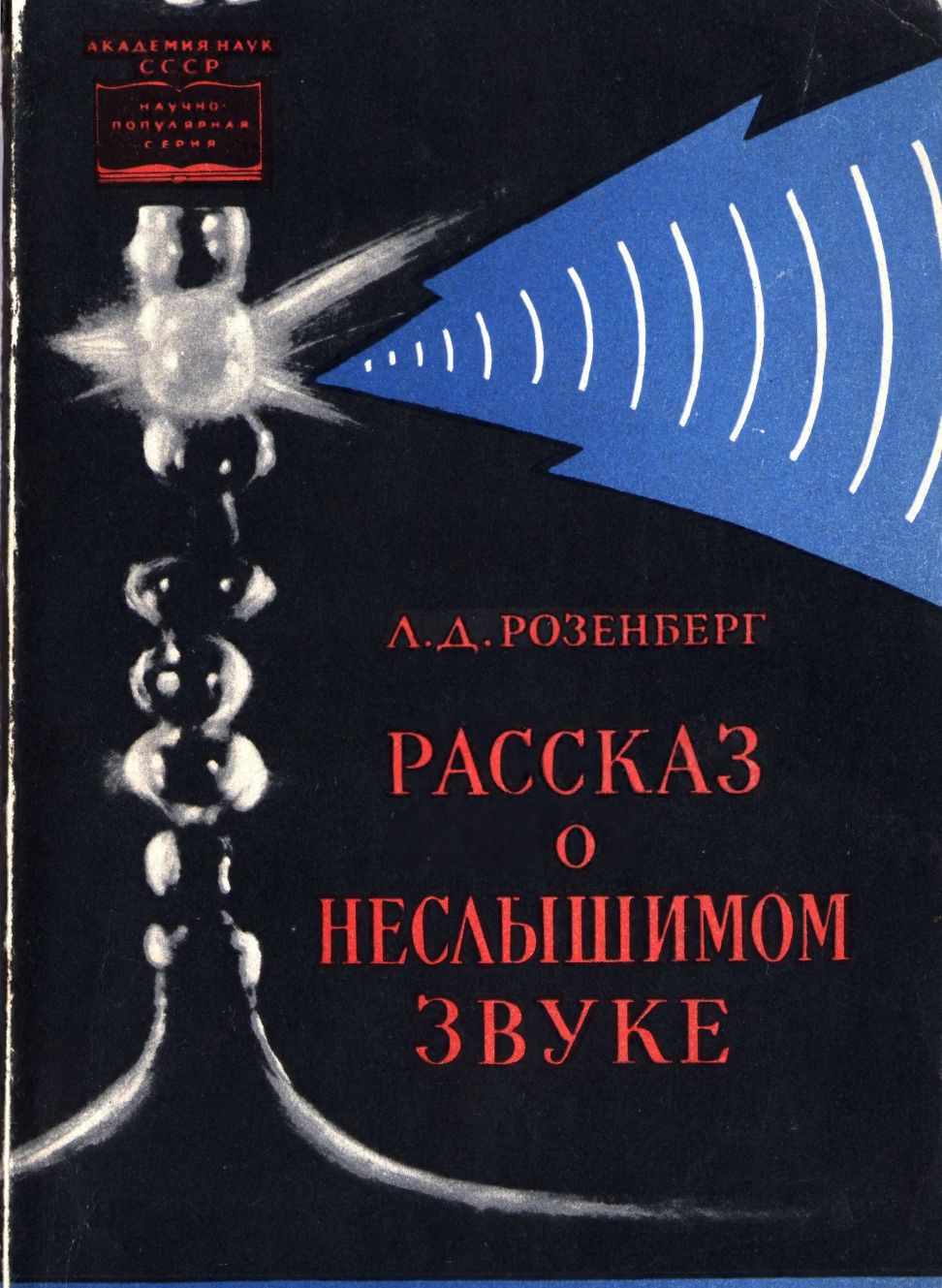
АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



Л. Д. РОЗЕНБЕРГ

РАССКАЗ О НЕСЛЫШИМОМ ЗВУКЕ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

Л. Д. РОЗЕНБЕРГ

РАССКАЗ О НЕСЛЫШИМОМ ЗВУКЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

МОСКВА 1961

Это рассказ об ультразвуке — звуке, который неслышим для человеческого уха. Книга известного советского ученого-акустика рассказывает о применении ультразвука в самых разных областях, будь то пайка алюминия или стирка белья, отыскание рыбных косяков в море или чистка часового механизма, получение лекарственных веществ или отыскание скрытых дефектов в деталях машин, измерение глубины моря или выявление раковых опухолей. Книга написана просто, увлекательно, хорошо иллюстрирована.

Введение

Стирка белья, пайка алюминия, разведка рыбных косяков, очистка часовых колесиков, консервирование меда, сварка фольги и тоненьких проволочек, окраска кожи и меха, устранение тумана на аэродроме, отыскание скрытых дефектов в деталях машин, получение суспензий лекарственных веществ, лужение стекла, определение профиля шахтного ствола, установление жирности свиньи, измерение глубины моря, выявление раковой опухоли... Что может быть общего у этих очень нужных, но совершенно различных практических задач? Почему они поставлены здесь в один ряд?

Все перечисленные задачи, а также еще и многие другие, могут быть решены при помощи ультразвука — неслышимых звуковых колебаний.

Наука об ультразвуке переживает сейчас свою молодость: каждый день приносит известия о новых открытиях и изобретениях и, конечно, еще далеко не все ясно и понятно, особенно в области практических применений. Наука зачастую отстает здесь от требований, выдвигаемых техникой. А технические задачи, решаемые при помощи ультразвука, как легко убедиться из перечня, которым начинается наш рассказ, чрезвычайно разнообразны!

Для того чтобы связать, систематизировать это обилие разнородных вопросов, предлагаемая книга построена следующим образом: в ней сначала излагается физическая сущность явлений, те особенности ультразвуковых эффектов, из которых вытекают возможности практических применений, а затем уже описываются наиболее интересные и перспективные применения.

В основу этой книги положена книга автора «Применения ультразвука», вышедшая в 1957 г. в Издательстве Академии наук СССР.

ГЛАВА

I

Неслышимые звуки

Звуковые волны — это упругие волны, распространяющиеся в любых материальных средах: в газах, жидкостях и твердых телах. Схематически распространение звуковых волн показано на рис. 1.

Для упрощения вместо реального источника звука рассмотрим источник в виде периодически раздувающегося и сокращающегося шарика. Такой шарик, расширяясь, сжимает непосредственно примыкающий к нему слой среды, который в свою очередь передает это сжатие следующему прилегающему слою. Такое сжатие проходит через всю среду. В следующий момент шарик сокращается и примыкающие к нему сжатые частички среды получают возможность расширяться; расширение тоже проходит через все пространство. Чередующиеся сжатия и разрежения, распространяющиеся во все стороны, и являются звуковыми волнами.

Расстояние между двумя соседними сжатиями или разрежениями распространяющейся звуковой волны **называется ее длиной.**

Звуковая волна несет с собой энергию. Количество энергии, проходящей через единицу поверхности, перпендикулярной к направлению распространения звуковой волны, за единицу времени определяет интенсивность (силу) звука. Единицей интенсивности звука служит, как правило, 1 *вт/см*^{2}.

Пространство, в котором распространяются звуковые волны, носит название *звукового поля*.

Поместим в какую-нибудь точку поля расходящейся волны приемник звука (таким приемником может быть, например, ухо наблюдателя) и будем постепенно удалять

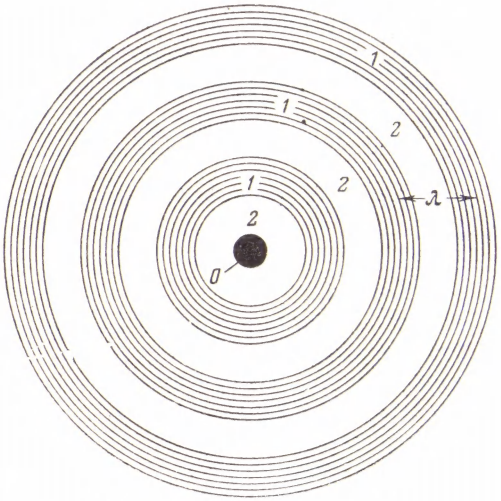


Рис. 1. Схема распространения сферической волны:
0 — источник; 1 — зоны сжатия; 2 — зоны разрежения; λ — длина звуковой волны

его от источника. Чем дальше мы будем отодвигать приемник от источника, тем меньшая часть всей излучаемой источником мощности попадет в приемник, т. е. тем меньше будет интенсивность звука. Можно подсчитать, что в случае идеального точечного излучателя интенсивность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Однако в действительности уменьшение интенсивности звука по мере удаления от источника зависит не только от расстояния между источником и приемником, а обусловлено еще и другой причиной. Дело в том, что в процессе сжатия и разрежения некоторая, небольшая доля энергии волны уходит на нагрев среды, в

которой звуковая волна распространяется. Этот процесс носит название п о г л о щ е н и я з в у к а.

Скорость распространения звуковых волн зависит от свойств среды: в более плотной среде волны распространяются медленнее, чем в среде менее плотной, в более упругой — быстрее, чем в менее упругой (скорость распространения звука в воздухе равна приблизительно 340 *м/сек*; в воде — более плотной, но и более упругой — 1500 *м/сек*; в стали — 5800 *м/сек*). Кроме того, скорость может изменяться в зависимости от температуры, давления и присутствия даже малых количеств различных примесей. Например, скорость звука в воздухе зависит от содержания водяных паров и углекислоты; скорость звука в морской воде колеблется в зависимости от ее солености и т. п. В табл. 1 приведена скорость распространения звука в различных средах.

Таблица 1

Скорость распространения звука в различных средах

Среда	Температура, °С	Скорость упругих волн, *м/сек*
Воздух	0	331
Воздух	20	343
Углекислота	0	259
Водород	0	1280
Вода пресная	17	1430
Вода морская	17	1500
Хлороформ	20	1000
Ртуть	20	1450
Этиловый спирт	20	1170
Стекло (флинт)	20	3760
Стекло (крон)	20	5260
Сталь	20	5800
Алюминий	20	6400
Ткани человеческого тела	20	1490—1610

Звук характеризуется частотой сжатий и разрежений, поочередно сменяющих друг друга в течение одной секунды. Совокупность сжатия и разрежения образует одно полное

колебание. За единицу частоты принято одно колебание в секунду. Эта единица названа герцем (*гц*)[1] в честь знаменитого немецкого физика Генриха Герца.

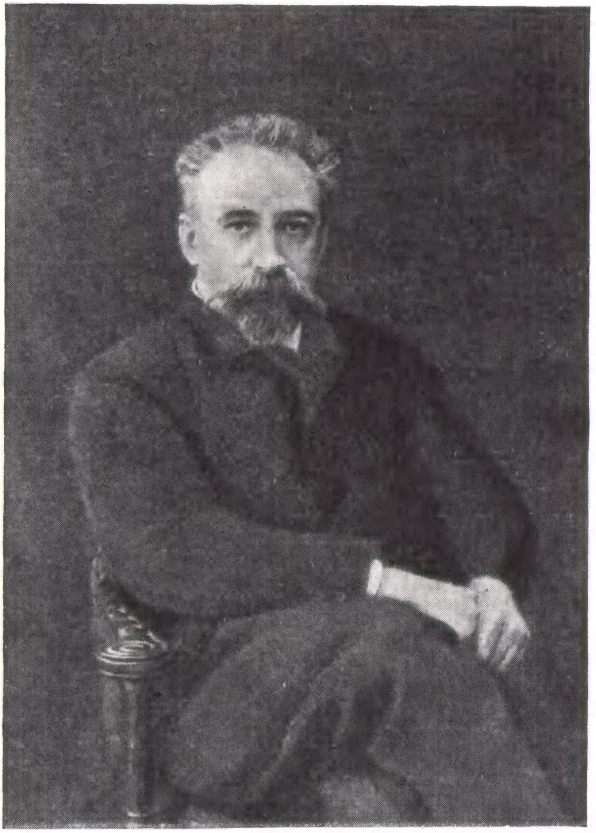
Ультразвуки

Колебания различной частоты воспринимаются человеческим ухом как звуки различной высоты. Низким звукам (звуки барабана, басовых труб и др.) соответствуют небольшие частоты (100—300 *гц*), высоким (флейта, свисток и др.) — бóльшие частоты (3—6 *кгц*). Звуки более низкие, чем 30 *гц*, и более высокие, чем 15 *кгц*, нашим ухом вообще не воспринимаются (пределы могут несколько изменяться в зависимости от индивидуальных и возрастных особенностей человека). Существование таких звуков может быть установлено при помощи специальных приборов.

Совокупность слышимых и неслышимых звуков в общем напоминает спектр солнечных лучей, в котором есть видимая область — от красного до фиолетового цвета, и две невидимые — инфракрасная и ультрафиолетовая. По аналогии с солнечным спектром звуки, которые не воспринимаются человеческим ухом, называются и н ф р а з в у к а м и, если их частота ниже 30 *гц*, и у л ь т р а з в у к а м и, если их частота выше 15 *кгц*. Поскольку граница частот, воспринимаемых нашим ухом, не является чем-то строго определенным, то и само деление звуков на слышимые и ультразвуки является в какой-то мере условным, во всяком случае, в области их соприкосновения. Если по поводу волн частотой в 1 *Мгц* ни у кого не возникает сомнений, отнести ли их к области ультразвуков или слышимых звуков, то по поводу волн с частотой, например, в 10—15 или даже 20 *кгц* этот вопрос решить совсем не так просто. Однако в этом нет необходимости. Переход от слышимых звуков к ультразвукам непрерывен и поэтому можно обойтись какой-то условной границей. В качестве последней разные авторы принимают разные цифры, лежащие в пределах от 10 до 20 *кгц*. Любопытно,

---

[1] Для сокращения 1000 *гц* называют к и л о г е р ц (*кгц*), а 1 000 000 *гц* — м е г а г е р ц (*Мгц*).



Петр Николаевич Лебедев
(1866—1912)

однако, отметить, что хотя такие ультразвуковые частоты, как 40—50 *кгц*, безусловно уже не воспринимаются нашим слуховым аппаратом, человеческий организм, как это было недавно установлено, чувствует их. Это восприятие, по-видимому, отличается от обычного слухового восприятия: изменение частоты не создает ощущения изменения высоты звука.

Возникает естественный вопрос: где же находится верхняя граница ультразвуков, т. е. какова частота самых высоких ультразвуков? Ответ на этот вопрос можно дать, если исходить из следующих соображений. При распространении звуковых волн часть их энергии поглощается средой, в которой они распространяются. Величина этой поглощенной доли зависит от свойств среды. Как правило, больше всего энергии поглощается в газах, меньше в жидкостях и еще меньше в твердых телах, в частности в металлах, кристаллах кварца и т. д. При этом поглощение всегда возрастает с увеличением частоты колебаний, т. е. высоты звука. Хорошим примером, подтверждающим это положение, является звучание удаляющегося оркестра: с увеличением расстояния сначала пропадают высокие звуки флейт и кларнетов, затем средние — корнетов и альтов, и, наконец, на значительных расстояниях слышен только большой барабан. Самые низкие звуки распространяются на самые далекие расстояния.

Оказалось, что этому правилу подчиняются и ультразвуки. Впервые на это обратил внимание знаменитый русский физик П. Н. Лебедев, ученики которого еще в 1906 г. разработали методы получения ультразвуковых колебаний и провели ряд интересных опытов с ультразвуком. Можно ожидать, что высшая граница ультразвуковых колебаний в материалах с малым поглощением находится в районе частоты в 100 млрд. *гц*. Ультразвуки еще более высоких частот должны поглощаться так сильно, что они будут полностью затухать уже у самой поверхности излучателя. Ультразвуки такой частоты пока еще не получены. Наиболее высокие ультразвуки, полученные сейчас, имеют частоту 25 млрд. *гц*. Звуки столь высоких частот могут распространяться — и то на очень небольшие расстояния — в кристаллах (например, кварца) при очень низких температурах вблизи абсолютного нуля.

Исследование распространения ультразвуковых волн в таких условиях позволяет выяснить некоторые существенные вопросы кристаллической структуры твердого тела.

Звуковые лучи

Мы привыкли к тому, что звуковые волны распространяются во все стороны от их источника. Например, когда говорит человек, то его одинаково, или почти одинаково, слышно спереди, сбоку и даже сзади; звук автомобильного гудка совершенно одинаково разносится во все стороны. Поэтому говорят, что источники слышимых звуковых волн не направлены. Если звуковая волна проходит через сравнительно небольшое отверстие, то она распространяется во все стороны, а не идет направленным пучком, как световой луч, прошедший через дырочку в непрозрачном экране. Шум улицы, проникающий в комнату через открытую форточку, практически одинаково слышен во всех точках комнаты, а не только против окна.

Хорошо известно, что световые лучи образуют тени непрозрачных предметов, находящихся на их пути, звуки же не образуют таких теней, во всяком случае тогда, когда размеры препятствий не очень велики. Звуковые волны как бы «обтекают» препятствия. Так, на концерте мы хорошо слышим все без исключения инструменты, несмотря на то, что многие из них мы не видим, так как они закрыты от нас другими. Чем объяснить, что звуку и свету, обладающим волновой природой, присущи такие, казалось бы, прямо противоположные свойства? Для того чтобы разобраться в этом, вернемся к понятию длины волны.

Как уже говорилось, длина волны — это расстояние, которое звуковая волна проходит за время одного полного колебания.

Из такого определения длины волны вытекает основное отношение, связывающее частоту звуковых колебаний f и длину волны λ со скоростью c распространения звука в данной среде:

$$c = \lambda f.$$

Если за время одного полного колебания звуковая волна проходит путь, равный длине волны λ, то за одну секунду она пройдет путь в f раз больше — λf, так как в течение секунды совершается f полных колебаний. Но путь, проходимый звуковой волной в течение одной секунды, есть не что иное, как скорость c распространения звука в данной среде.

Из этого соотношения видно, что чем больше частота, тем меньше длина волны в данной среде. Поскольку частота ультразвуков значительно выше частоты слышимых звуков, то и длина их волн соответственно короче. В табл. 2 приведены величины длин волн для разных частот в наиболее часто применяющихся материалах.

Таблица 2

Длины волн в различных средах при разных частотах

Частота	Скорость		
	в воздухе (при 20°)	в морской воде (при 17°)	в алюминии (при 20°)
50 *гц*	6,9 *м*	30 *м*	128 *м*
500 *гц*	69 *см*	3 *м*	12,8 *м*
5 *кгц*	6,9 *см*	30 *см*	1,28 *м*
50 *кгц*	6,9 *мм*	3 *см*	12,8 *см*
500 *кгц*	0,69 *мм*	3 *мм*	12,8 *мм*
5 *Мгц*	0,069 *мм*	0,3 *мм*	1,28 *мм*

Оказывается, характер распространения волн у препятствия существенно зависит от соотношения между размерами препятствия и длиной волн. Если размеры препятствия малы по сравнению с длиной волны или соизмеримы с ней, то волны обтекают это препятствие, не давая тени. Так волны, пройдя через отверстие, размеры которого малы по сравнению с длиной волны, распространяются (растекаются) во все стороны. Если же препятствие велико по сравнению с длиной волны, то растекания не происходит и за препятствием образуется тень.

Волны слышимых звуков имеют длину порядка десятков сантиметров или 1—2 *м*. Поэтому окружающие нас предметы, размеры которых не превышают 1—2 *м*, не

являются препятствием для звуковых волн: они их обтекают, не давая звуковой тени. Длины же световых волн измеряются десятитысячными долями миллиметра, и поэтому все окружающие нас предметы дают резкие тени.

Ультразвуки отличаются от обычных звуков тем, что обладают значительно более короткими волнами. В силу этого они, подобно световым лучам, дают звуковые тени и могут быть получены в виде узких пучков, которые по аналогии со световыми принято называть ультразвуковыми пучками.

Рассмотрим теперь, что произойдет с ультразвуковым лучом, если он в процессе распространения попадет на границу двух различных сред, например воздуха и воды, кварца и алюминия и т. д. В этом случае часть звуковой энергии пройдет во вторую среду в виде такого же луча, только меньшей интенсивности, а другая часть отразится. Лучше всего ультразвуковой луч проходит из твердого тела в твердое, из жидкости в жидкость и из газа в газ; значительно хуже из жидкости в твердое тело и соответственно из твердого тела в жидкость и совсем плохо из газа в жидкость или в твердое тело и наоборот.

Опыт показывает, что из воды в воздух и из воздуха в воду звук практически не проходит. Кому приходилось нырять в воду, тот хорошо знает, что под водой не слышно разноголосого шума, царящего на пляже, но проявляются новые шумы, например шум винтов проходящей мимо моторной лодки.

Из алюминия в кварц ультразвук проходит почти без ослабления, хотя кварц совершенно не похож по своим физическим свойствам на алюминий.

Отметим как особенно важное обстоятельство следующее: кусок металла, находящийся в воде, представляет такое же преодолимое препятствие для звукового луча, как и воздушный пузырь; звук, распространяющийся в куске металла, не в состоянии пройти через пересекающую его путь трещину, как бы тонок ни был слой воздуха в ней.

Как мы увидим далее, на этих свойствах звуковых лучей основано их применение для отыскания скрытых дефектов в металлических изделиях: раковин, трещин и т. п.

На рис. 2 показан процесс падения ультразвукового луча на границу раздела керосина и воды. Хорошо видны падающий, отраженный и прошедший во вторую среду лучи. Видно также, что сам процесс отражения и преломления происходит по законам геометрической оптики.

Малая длина ультразвуковых волн и связанная с этим возможность образования ультразвуковых пучков позволяют не только сосредоточить всю энергию ультразвука в нужном направлении, но и фокусировать ультразвуковые лучи, т. е. концентрировать всю энергию излучателя в небольшом объеме. Звуковые линзы по форме очень напоминают обычные оптические.

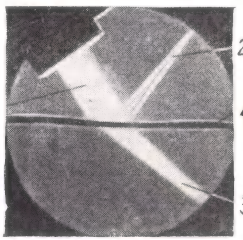


Рис. 2. Переход ультразвукового луча через границу двух сред:

1 — падающий луч; 2 — отраженный луч; 3 — прошедший преломленный луч; 4 — граница раздела керосина и воды

Правильным будет заключение, что многие свойства ультразвуковых лучей аналогичны свойствам лучей световых. Но ультразвуковые лучи могут распространяться и в таких средах, которые для световых лучей непрозрачны. Это позволяет использовать ультразвуковые лучи для исследования оптически непрозрачных тел.

Применение ультразвука позволило бы быстро и просто отыскать под водой затонувшие корабли, обнаруживать залежи полезных ископаемых в земной коре, внутренние трещины и раковины в металлических изделиях. Капитан корабля был бы уверен, что он никогда не посадит корабль на мель; врач сразу обнаружил бы в теле больного раковую опухоль; команде рыболовецкого сейнера ультразвук подсказал бы, как заводить сеть для того, чтобы получить наибольший улов рыбы, а дежурному инженеру ТЭЦ сигнализировал бы о необходимости ремонта котла, стенка которого вследствие коррозии стала настолько тонкой, что это может грозить взрывом.

Однако человек непосредственно не воспринимает ультразвук, так же как он не воспринимает ультрафиолетовые лучи и инфракрасные лучи и радиоволны.

На помощь человеку приходят приборы, принимающие ультразвук. В этих приборах есть много элементов,

напоминающих оптические. Это «освещающие» излучатели ультразвука, ультразвуковые объективы и даже «звукочувствительные» слои, которые под действием звука темнеют так же, как светочувствительный слой фотопластинки или фотобумаги темнеет под действием света.

Интенсивность ультразвуковых волн

Интенсивность обычных, воспринимаемых нашим ухом звуков очень мала. Например, громкому разговору соответствует интенсивность звука, равная приблизительно одной миллиардной доле ватта на квадратный сантиметр. Поскольку общая площадь двух слуховых каналов наших ушей приблизительно равна 1 $см^2$, то мощность в одну миллиардную долю ватта мы уже воспринимаем как достаточно громкий звук. Если бы мы хотели вскипятить чайник с водой, используя энергию звуков речи, превращенную в тепло без всяких потерь, то для этого понадобилась бы энергия непрерывного громкого разговора всех жителей Москвы в течение суток, тогда как на электрической плитке такой чайник закипает в течение 20 мин. А мощность, которая получилась бы при одновременном крике всех людей земного шара, была бы в 2 раза меньше мощности, развиваемой мотором легковой машины «Победа».

С ультразвуками совсем иначе. Мощности ультразвуков, полученных от искусственных источников, могут достигать десятков, сотен ватт или даже нескольких киловатт, а интенсивности — десятков и сотен ватт на квадратный сантиметр.

Ультразвук, таким образом, позволяет передать внутрь материальной среды очень большую энергию механических колебаний; при этом в среде, особенно жидкой, возникают новые интересные явления, которые могут быть широко использованы на практике.

Чтобы уяснить себе это, рассмотрим, например, явление звукового давления. Если звуковая волна распространяется в воздухе, то под термином «звуковое давление» понимают то избыточное по отношению к атмосферному давление или разрежение, которое возникает в воздухе при прохождении волны.

Величина звукового давления непосредственно связана с интенсивностью звука, и для слышимых звуков это давление мало: например, для звуков, соответствующих разговору средней громкости, оно составляет около 0,001 *г/см*^{2}; такое давление оказывает мошка, сидящая на листочке, плывущем по воде. При интенсивности ультразвуковой волны 3—5 *вт/см*^{2} звуковое давление в воде оказывается равным нескольким атмосферам, т. е. в несколько миллионов раз превышает давление звуков речи. К тому же нужно учесть, что это давление меняет свой знак, т. е. переходит в разрежение, причем этот процесс совершается много тысяч раз в секунду.

Эффекты второго порядка

При объяснении процесса распространения звука в непрерывной среде обычно подчеркивают то обстоятельство, что частички среды колеблются в одну и другую сторону от положения равновесия, причем их среднее положение остается неизменным. Другими словами, указывают на то, что перемещается в пространстве только волна, только звуковая энергия, сама же среда не перемещается. В качестве примера, иллюстрирующего это утверждение, обычно приводят легкую щепочку, качающуюся на поверхности воды, по которой проходит волна. Указывают, что, несмотря на явно видимое глазом движение волны, щепочка колеблется только вверх и вниз и не перемещается вместе с волной. Однако это объяснение совершенно неправильно, если речь идет о звуковых колебаниях высокой интенсивности. Именно эти колебания и нашли широкое применение в различных областях техники. Колебания высокой интенсивности характеризуются рядом особенностей, отличающих их от рассмотренного выше процесса распространения звуковых колебаний малой интенсивности. Это так называемые эффекты второго порядка. Одни из них существуют и в слабых звуках, правда, они настолько малы, что их очень трудно наблюдать. Относительно других скорее можно предположить, что при слабых звуках они не существуют вовсе, а появляются лишь в том случае, если интенсивность звука превышает порог, необходимый для развития данного явления.

Далеко не все эффекты второго порядка имеют в данное время точное физическое объяснение. Однако ввиду того, что они неизбежно сопутствуют звуковым колебаниям высокой и средней интенсивности, нужно дать хотя бы их описание.

Один из этих эффектов открыт выдающимся английским физиком Дж. Рэлеем, заложившим своими работами фундамент современной акустики. Рэлей показал, что если на пути звуковой волны на упругой нити подвесить плоский диск, расположенный под углом к направлению распространения волны, то на этот диск со стороны волны будет действовать пара сил, момент которой будет стремиться повернуть диск таким образом, чтобы он расположился перпендикулярно к направлению распространения волны (рис. 3). Сила, поворачивающая диск, пропорциональна интенсивности звуковых колебаний. Поэтому диск Рэлея может быть применен в качестве прибора для измерения интенсивности звука.

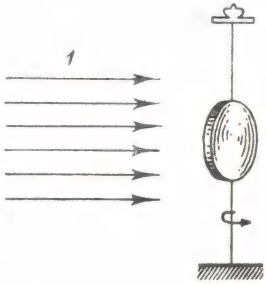


Рис. 3. Диск Рэлея:
1 — падающая звуковая волна

Недостатком этого метода измерения является чувствительность диска к постоянным воздушным потокам, которые существуют неизбежно вследствие температурной неоднородности воздуха. Эти потоки, все время действуя на диск, поворачивают его в разные стороны. Но еще 20—30 лет назад, когда не было лучших методов измерения интенсивности, применяли диск Рэлея, который помещали в отдельную, по возможности герметизированную, комнату или камеру, а наблюдение за его отклонением вели снаружи через зеркальное окно. В камере выключали все отопительные приборы и другие возможные источники местного нагрева воздуха. Даже при этих условиях диск успокаивался лишь через много часов после того, как экспериментатор, установивший аппаратуру, выходил из камеры и плотно закрывал за собой дверь.

В настоящее время диск Рэлея практически вышел из употребления. Однако сам эффект используется в одном

из наиболее распространенных методов визуализации (наблюдения) звуковых изображений.

С прохождением звуковой волны связан не только эффект Рэлея. Например, звуковая волна оказывает постоянное, так называемое р а д и а ц и о н н о е, давление на находящиеся на ее пути препятствия. Радиационное давление никоим образом не следует смешивать с переменным звуковым, являющимся основным признаком существования волны.

Переменное звуковое давление, как мы уже говорили, представляет собой чередование сжатий и разряжений, причем амплитуда сжатия всегда равна амплитуде разрежения. На препятствие, находящееся в поле звуковой волны, звуковое давление действует таким образом, что создает на поверхности этого препятствия силу, меняющую свой знак в соответствии с частотой колебаний звуковой волны. Если на пути распространения звуковой волны поместить пластинку, то на эту пластинку в моменты, соответствующие фазе сжатия, будет действовать сила, стремящаяся сдвинуть ее по направлению распространения волны, а в моменты, соответствующие фазе разрежения,— в противоположном направлении. И так как обе эти силы равны по величине и сменяют одна другую много сотен или тысяч раз в секунду, то в результате пластинка остается неподвижной. Звуковое давление не создает постоянной (по направлению) силы у поверхности препятствия.

Радиационное давление существует наряду с переменным звуковым давлением [1] и выражается в том, что поверхность препятствия испытывает постоянное по величине и по знаку давление, стремящееся сдвинуть это препятствие по направлению распространения волны.

Интересно отметить, что радиационное давление сопровождает процесс распространения не только звуковых, но и электромагнитных волн, в том числе и световых. В последнем случае оно называется д а в л е н и е м с в е т а, и именно его исследование и измерение принесли славу выдающемуся русскому физику П. Н. Лебедеву.

Радиационное давление в звуковой волне было в 1903 г. впервые экспериментально подтверждено В. Я. Альтбергом, учеником П. Н. Лебедева.

[1] Для простоты часто пропускают слово «переменное» и говорят «звуковое давление».

Поскольку радиационное давление пропорционально интенсивности звуковой волны, оно может быть использовано для ее измерения. Соответствующие приборы носят название р а д и о м е т р о в. Первый радиометр, сконструированный Альтбергом, был назван им давильным прибором (рис. 4).

Сейчас радиометры применяются в лабораторных исследованиях как измерительные приборы. Основная часть радиометра — крылышко, поворачивающееся под действием радиационного давления на некоторый угол, зависящий от величины этого давления, а следовательно, и от интенсивности звука.

Поглощение интенсивных звуковых колебаний в жидкостях и газах существенно отличается от уже рассмотренного нами выше поглощения слабых звуков. Если при распространении слабых звуков поглощенная доля энергии не зависит от интенсивности звука, то для мощных звуков эта доля растет с увеличением интенсивности. Поглощенная энергия растет с увеличением интенсивности не только абсолютно, но и относительно. Кроме повышенного поглощения, при высокой интенсивности начинает изменяться и форма звуковой волны. Ее «верхушка» всегда бежит чуть-чуть быстрее, чем «впадина», потому что местоположению верхушки соответствует уплотненная самим же звуком среда, в которой скорость распространения больше, а местоположение «впадины» — разреженная, где скорость распространения меньше. При слабых звуках эта разница ничтожна и не оказывает никакого влияния. Для интенсивных же звуков это различие оказывается существенным, и верхушки начинают понемногу «догонять» впадины. Вместо плавной синусоидальной кривой распространяющаяся волна принимает пилообразный вид (рис. 5).

Следующим эффектом второго порядка является звуковой ветер. Опыт показывает, что сколько-нибудь мощный излучатель не только приводит прилегающие к нему частицы той или иной среды в колебательное движение относительно положения равновесия, но и вызывает постоянное их смещение, постоянный поток, который носит название звукового ветра.

В Ленинградском физико-техническом институте по предложению академика Н. Н. Андреева на принципе

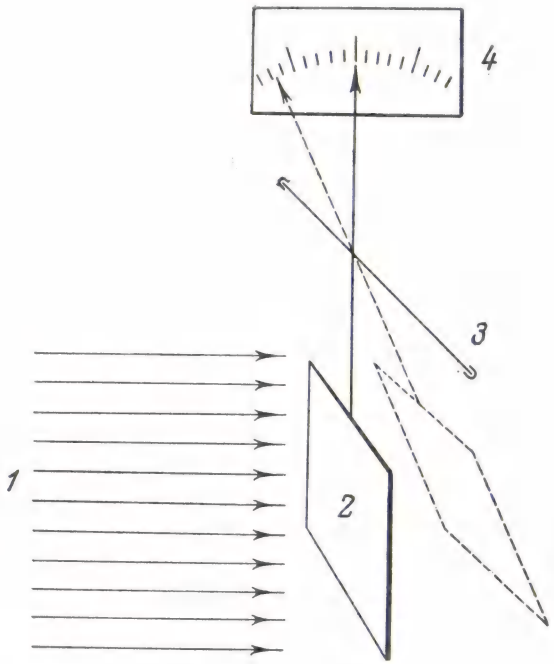


Рис. 4. Радиометр:
1 — падающая звуковая волна; 2 — крылышко;
3 — ось вращения; 4 — шкала и стрелка

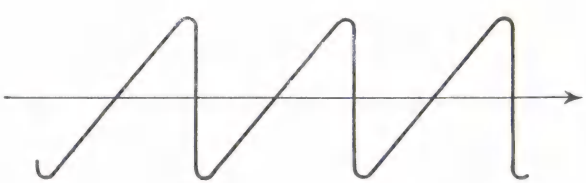


Рис. 5. Форма интенсивной волны

звукового ветра была сконструирована воздуходувка, производительности которой хватало для газовой горелки.

Нас звуковой ветер будет интересовать постольку, поскольку он проявляется в виде сильных течений, вызванных действием сильных ультразвуков и приводящих к интенсивному перемешиванию жидкостей. Перемешивание очень ускоряет ряд производственных процессов.

Любопытные явления можно наблюдать в том случае, когда при своем распространении ультразвуковой пучок и сопровождающий его звуковой ветер попадают изнутри жидкости на ее свободную поверхность. На ней тогда появляется рябь, которая при увеличении интенсивности звука переходит в бурун. Жидкость поднимается и стоит горкой. Иногда в некоторых местах буруна вылетают небольшие капельки жидкости. Такие буруны наблюдались еще в известных опытах американских ученых Р. Вуда и А. Лумиса, которые в 1947 г. впервые получили и исследовали ультразвук высокой интенсивности, наметив тем самым новое направление в ультраакустике. Если еще больше увеличить интенсивность звука, то число одновременно вырывающихся с поверхности буруна капель увеличивается, и они сливаются в один общий фонтан, представляющий собой довольно эффектное зрелище (рис. 6). Высота такого фонтана зависит от интенсивности ультразвука и от свойств жидкости. При большой интенсивности высота фонтана может достигать нескольких десятков сантиметров. На боковой поверхности фонтана можно наблюдать эффект распыления жидкости, проявляющийся в виде образования туманного облачка (рис. 7, *а*).

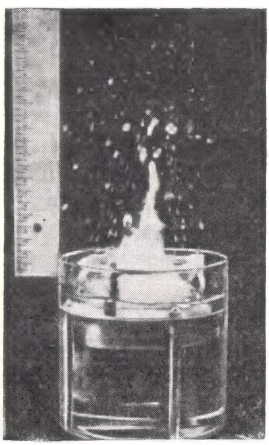
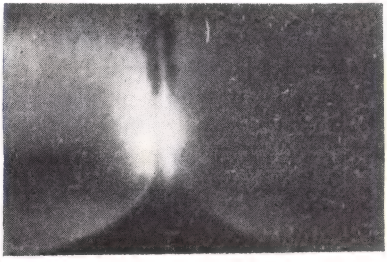


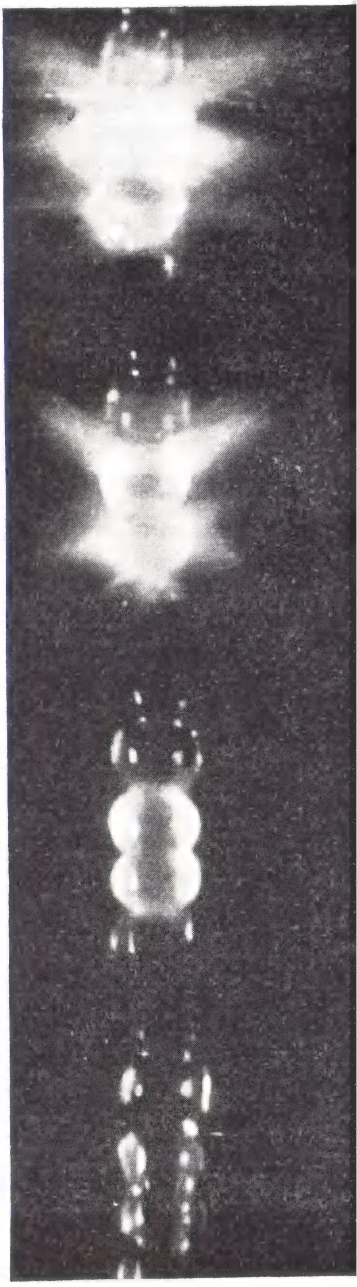
Рис. 6. Ультразвуковой фонтан

Если снимать с большей скоростью и с бóльшим оптическим увеличением, можно заметить, что процесс образования тумана не является непрерывным, а идет отдельными, сравнительно редкими взрывами. На рис. 7, *б*

Рис. 7. Мгновенные снимки распыления жидкости в ультразвуковом фонтане при экспозиции около 0,0001 сек.



а



б

приведены четыре последовательные фотографии участка фонтана, снятые с интервалом времени около 1/5000 сек. На первой фотографии нет никаких следов туманообразования: видны гладкие, ровные бусины. На следующем снимке можно видеть подготовку намечающегося взрыва. На третьем и четвертом зафиксирован уже развившийся взрыв: хорошо видно облако выброшенного тумана. Полученный при помощи ультразвукового распыления туман, или, как говорят, а э р о з о л ь, отличается от аэрозолей, получаемых другими способами, например распылением форсункой, очень маленькими размерами капелек жидкости. Кроме того, большинство капелек получается при этом одинакового размера. Как показал опыт, размеры капелек зависят от частоты применяемого для распыления ультразвука: чем выше частота, тем мельче капелька. Эффект ультразвукового распыления используется для получения аэрозолей лекарственных веществ.

Мы описали только наиболее существенные эффекты, сопровождающие распространение мощных ультразвуковых волн в отличие от распространения слабых звуков. Но даже и эти, давно известные и широко встречающиеся эффекты, как мы видели, далеко не полностью изучены. Эта область акустики еще ждет своих исследователей.

Ультразвуковая кавитация

С распространением интенсивных ультразвуковых колебаний в жидкости связан интересный эффект, называемый ультразвуковой кавитацией.

Мы уже знаем, что даже при небольшой, несколько ватт на квадратный сантиметр, интенсивности ультразвука переменные звуковые давления достигают двух и больше атмосфер. Эти переменные давления накладываются на постоянное гидростатическое давление, которое, как известно, определяется высотой столба жидкости в сосуде и давлением газа над поверхностью этой жидкости. Жидкость, налитая в сосуд небольшой высоты, на открытом воздухе испытывает гидростатическое давление, приблизительно равное атмосферному, т. е. 1 *кг/см*^{2}. Если в этой жидкости распространяется звуковая волна, развивающая давление в 0,5 *кг/см*^{2}, то в моменты сжатия суммарное давление, действующее на жидкость, составляет 1,5 *атм*,

а в моменты разрежения — 0,5 *атм*. При звуковом давлении, равном 1 *атм*, эти цифры соответственно будут 2 и 0. При амплитуде давления, превышающей 1 *атм*, например при 2 *атм*, в моменты сжатия на частички воды будут действовать сжимающие (рис. 8, *а*) силы в 3 *атм*, а в моменты разрежения — растягивающие (рис. 8, *б*) силы, равные 1 *атм*.

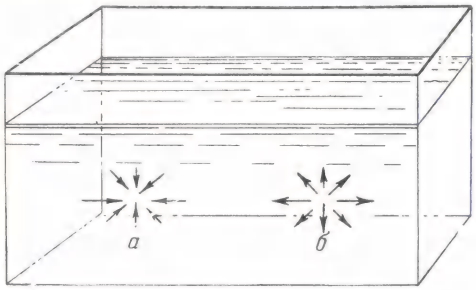


Рис. 8. Действие сжимающих и растягивающих сил на жидкость

Отличительным свойством почти всех жидкостей является способность легко «переносить» очень большие всесторонние сжатия; мы знаем, что в гидравлических прессах эти сжатия достигают десятков и сотен атмосфер. Вместе с тем жидкости чрезвычайно чувствительны к растягивающим усилиям.

При прохождении волны в моменты, соответствующие фазе разрежения, в жидкости образуется очень большое количество разрывов в виде мельчайших пузырьков. Жидкость рвется обычно в тех местах, где прочность ее ослаблена пузырьками газа, частицами посторонних примесей и др.

Нужно сказать, что природа этих слабых мест, которые носят название к а в и т а ц и о н н ы х з а р о д ы ш е й, до сих пор еще не выяснена. Подсчеты показывают, что чистая жидкость, например вода, должна была бы разрываться лишь при давлении около 2000 *атм*. С другой стороны, еще никому не удалось очистить воду до такой степени, чтобы она выдерживала давление больше 200 *атм*. Значит, несмотря на самую тщательную очистку воды,

в ней что-то остается. Это «что-то» могло бы быть газовыми пузырьками; но маленькие пузырьки должны раствориться в жидкости, а большие — всплыть. Не подтверждается также предположение о том, что кавитационные зародыши — это твердые частицы; опыт показывает, что если предварительно подвергнуть воду большому статическому сжатию (в несколько тысяч атмосфер), порог кавитации, т. е. давление, при котором она возникает,— повышается. А ведь статическое давление ничего не может сделать с твердыми частицами. Остается предположить, что в трещинах этих твердых частиц сидят пузырьки слишком большие для того, чтобы раствориться, которые не всплывают, так как они связаны с твердой частицей. Но можно также думать, что в жидкости плавают пузырьки газа, защищенные очень тонкой, толщиной в несколько молекул, жировой пленкой. Эта пленка защищает их от растворения, но раздавливается при сильном статическом давлении. Все эти гипотезы ждут своей экспериментальной проверки.

В соответствии с одной из гипотез, кавитационные зародыши — результат космического облучения или естественной радиоактивности, воздействующих на все находящееся на земле. Проведенные совсем недавно исследования действительно показали, что если облучать воду ионизирующим излучением, то ее кавитационный порог (давление, при котором она возникает) падает. Однако еще не доказано, что эта причина является единственной.

Кавитационные пузырьки после кратковременного существования захлопываются; часть из них «живет» совсем мало: от фазы разрежения до следующей фазы сжатия, т. е. полпериода ультразвуковой волны, часть же «живет» значительно дольше. Удавалось наблюдать пузырьки, продолжительность существования которых составляла несколько десятков, а иногда и сотен периодов. Но рано или поздно каждый кавитационный пузырек захлопывается. Во время этих захлопываний развиваются большие местные мгновенные давления, достигающие сотен атмосфер.

На рис. 9 показана мгновенная фотография захлопывающегося пузырька; хорошо видна возникшая в результате этого ударная волна. Она-то и несет большие давления, приводящие к механическим разрушениям поверхности твердого тела, находящегося в зоне действия ударной волны.



Рис. 9. Ударная волна, образовавшаяся при захлопывании кавитационного пузырька



Рис. 10. Кавитационные разрушения поверхности свинца

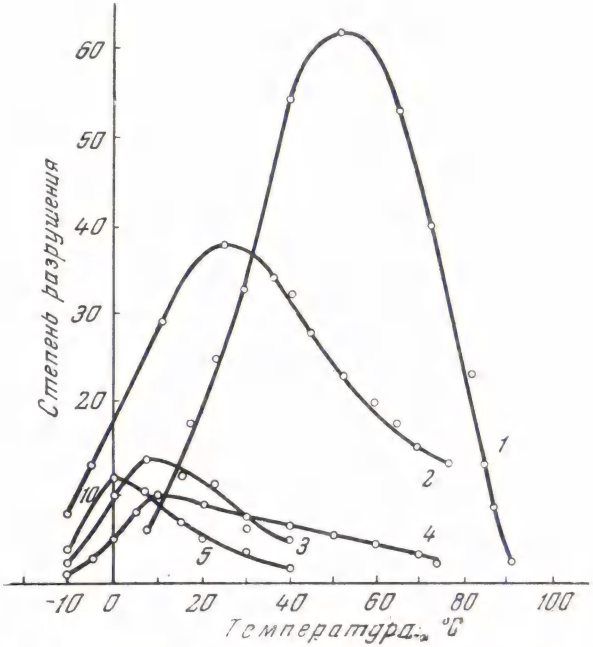


Рис. 11. Зависимость степени кавитационного разрушения от температуры:

1 — в воде; 2 — в керосине; 3 — в бензине; 4 — в этиловом спирте; 5 — в ацетоне

На рис. 10 показан вид металлической поверхности, подвергавшейся воздействию кавитации. Отчетливо видны значительные разрушения.

Эффект кавитации не новое явление, открытое в связи с изучением ультразвука. Образование и захлопывание кавитационных пузырьков наблюдали и ранее при наличии быстро движущихся потоков жидкости, например на лопастях корабельных винтов, вращающихся с большой скоростью. Известно было также, что кавитация может приводить к значительным разрушениям поверхностей винтов.

Кавитация, вызываемая ультразвуком, представляет интерес в том отношении, что она управляема: мы можем ее создавать в нужных местах и нужных дозах. Это обстоятельство дает возможность использовать явление кавитации, которое ранее приносило только вред.

Если проследить зависимость разрушения, наносимого кавитацией, от температуры, то обнаруживается любопытное явление. С увеличением температуры кавитационное разрушение растет до некоторого определенного максимума, пройдя который оно начинает падать. Оказывается при этом, что температура, при которой этот максимум наступает, зависит только от жидкости, в которой возникает кавитация. На рис. 11 приведены кривые зависимости кавитационного разрушения алюминия от температуры в воде, ацетоне, бензине и других растворителях.

Величина кавитационного разрушения тоже зависит от жидкости, например в воде разрушение больше, чем в других растворителях (см. рис. 11).

Почему с увеличением температуры разрушение растет до определенного максимума — это понятно, так как при этом увеличивается количество кавитационных зародышей, выделяются пузырьки растворенного газа и др. Однако с первого взгляда не ясно, почему с дальнейшим повышением температуры величина разрушения начинает падать. Исследования показали, что пары жидкости и растворенные ранее в жидкости газы успевают продиффундировать внутрь образовавшегося кавитационного пузырька. С повышением температуры упругость паров и газов растет и в пузырьке возникает противодавление, в результате чего он захлопывается не так стремительно, а сила удара значительно уменьшается. Таким образом.

становится понятно, почему при повышении температуры общее разрушение уменьшается несмотря на то, что количество кавитационных пузырьков продолжает возрастать.

Разрушение в воде потому больше, чем в органических растворителях, что растворимость воздуха (кислорода и азота) в воде намного меньше. Если же воду насытить хорошо растворяющимся в ней газом, например углекислотой, то кавитационное разрушение падает практически до нуля.

Исходя из всех этих соображений, можно регулировать интенсивность кавитационного разрушения, подбирая нужную жидкость, ее температуру и газовую атмосферу.

Каждый пузырек совершает ничтожную работу, потому что процесс захлопывания занимает мало времени, однако общее производимое им действие может быть очень существенным. Подсчет показывает, что кавитационный пузырек в звуковом поле даже сравнительно низкой частоты (25 *кгц*) наносит столько ударов за минуту, сколько молотобоец за 8 час. ежедневной непрерывной работы в течение двух месяцев. Конечно, удар одного пузырька может отколоть лишь крохотный кусочек металла, но ведь в каждой фазе разрежения их образуются тысячи.

Действие кавитации не ограничивается только механическими эффектами. Процессы, развивающиеся в самих пузырьках, имеют более сложную природу. Если наблюдать кавитационное облачко в темноте, то можно заметить, что оно слабо светится. Это явление носит название с о н о л ю м и н и с ц е н ц и и. По поводу его происхождения существуют две гипотезы. Как мы уже знаем, в кавитационном пузырьке всегда содержится некоторое количество паров и растворенных в жидкости газов. В соответствии с одной гипотезой, при быстром сжатии пузырька его газообразное содержимое не успевает перейти обратно в жидкость и начинает светиться, сильно нагреваясь от сжатия. По другой гипотезе, газ в пузырьке светится от того, что на поверхности пузырька в момент его образования появляются маленькие электрические заряды. Заряды эти малы, но и размеры тоже малы, поэтому внутри пузырька образуется сильное электрическое поле, которое вызывает пробой; внутри пузырька проскакивает крохотная электрическая искорка. Какая из этих двух гипотиз правильнее — пока еще

трудно сказать. Но какова бы ни была природа свечения газа в пузырьке, она всегда приводит к ионизации его содержимого: в кавитационном пузырьке образуют химически активные ионы и радикалы — атомарный водород, гидроксил и т. д. После захлопывания пузырька все эти продукты попадают в исходную жидкость и могут вызвать в ней разного рода химические взаимодействия. Иногда этим ускоряются те химические реакции, которые и без ультразвука проходят в данном растворе, иногда же это новые реакции, которые не происходят без ультразвука вообще.

Учение о воздействии ультразвука на химические реакции — с о н о х и м и я — только еще начинает развиваться. Любопытно, что уже замечено много общего с другой, тоже молодой наукой — р а д и а ц и о н н о й х и м и е й. Это объясняется тем, что несмотря на совершенно разную физическую сущность (ультразвук и радиоактивные излучения) воздействие на химические реакции получается в результате одинакового промежуточного процесса — ионизации.

Итак, мы видим, что явление ультразвуковой кавитации представляет собой сложный и недостаточно еще изученный комплекс механических, электрических, световых и химических явлений.

Ультразвук в природе

Вся окружающая нас природа наполнена ультразвуками. До последнего времени это обстоятельство ускользало от нашего внимания только потому, что в нашем распоряжении не было средств для обнаружения ультразвуковых колебаний. Когда же такие средства — приемники ультразвука — были сконструированы и построены, то оказалось, что ультразвуки присутствуют в шуме ветра и в шуме морского прибоя, в шуме водопада и в шуме железнодорожного поезда. К ультразвуковым шумам неживой природы присоединяются ультразвуки, производимые различными живыми существами—от комаров до китов.

Широкие исследования показали, что многие насекомые излучают звуковые волны, например пчелы излучают ультразвуки при роении. Измерения электрических токов

слуховой улитки показали, что многие насекомые также и воспринимают ультразвуки (сверчки, цикады, кузнечики).

В джунглях обнаружили ультразвуки частотой до 30 *кгц*; сильнее всего они «слышны» были вечером (их интенсивность доходила до $3 \cdot 10^{-10}$ *вт/см*^{2}), в течение ночи колебания несколько ослаблялись, а в дневную жару пропадали совсем. Американской экспедиции, установившей это интересное явление, не удалось выявить его источники.

Что касается более высоко организованных животных, то восприятие ультразвуков в диапазоне частот до 100 *кгц* обнаружено у многих грызунов (мыши, хомяки, морские свинки и др.). Проще всего это заметить по рефлексу подергивания ушных раковин и усиков. Известно также, что и собаки воспринимают колебания частотой до 100 *кгц*. Этим пользуются при подаче собакам командных сигналов, которых окружающие не слышат. В последнее время появились указания на то, что такие крупные млекопитающие, как дельфин и кит, могут излучать и воспринимать ультразвуки с частотой до 20—30 *кгц*.

Интенсивность ультразвуковых шумов в живой природе невелика. Она того же порядка, что и интенсивность человеческой речи или слышимых звуков, издаваемых животными. Что же касается ультразвуковых шумов механизмов, то они иногда могут достигать очень больших интенсивностей. Так, например, в шуме реактивных самолетов ультразвуки настолько сильны, что могут оказать вредное воздействие на слух и организм команды и пассажиров, поэтому приходится применять специальные меры по звукоизоляции.

ГЛАВА

II

Получение ультразвука

Несмотря на то, что ультразвуки так распространены в природе, для изучения, а тем более для использования ультразвуковых колебаний природные источники непригодны.

Нужно уметь получать ультразвуковые колебания нужных частот и мощностей искусственным способом.

Приборы, которые служат для искусственного получения ультразвуков, называются ультразвуковыми излучателями. Существующие типы излучателей могут быть разбиты на две основные группы: механические и электромеханические.

Механические излучатели (свистки, сирены)

Простейший тип механического излучателя ультразвука — всем известный свисток, в котором процесс возбуждения звуковых колебаний происходит за счет того, что струя воздуха разбивается об острый край внутренней полости свистка. Размеры этой полости определяют частоту и, следовательно, высоту получающегося звука: чем меньше размеры полости, тем выше звук. Уменьшая размеры, нетрудно добиться того, что свисток начнет издавать звуки очень большой частоты, уже не воспринимаемые ухом.

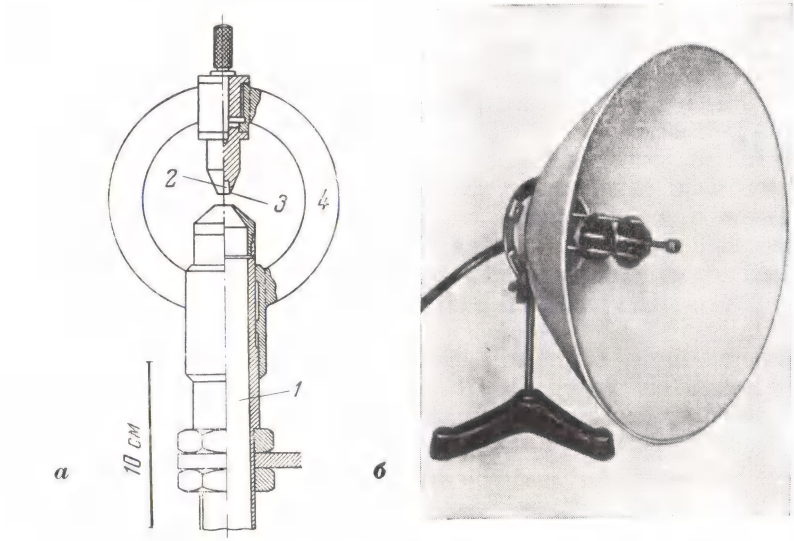


Рис. 12. Струйный ультразвуковой генератор:
а — разрез; б — генератор, помещенный в фокус параболического зеркала

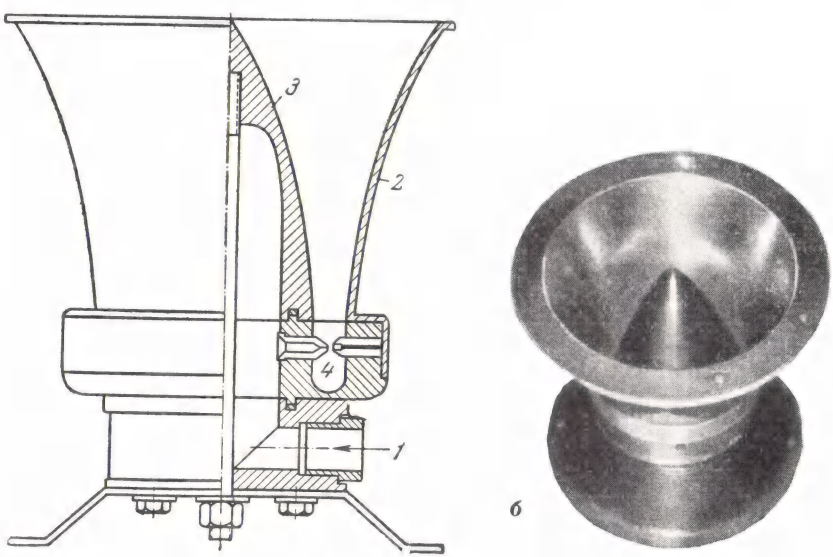


Рис. 13. Батарейный свисток:
а — схема; б — внешний вид.
1 — подача сжатого воздуха; 2 — наружная стенка общего рупора; 3 — внутренняя стенка рупора; 4 — один из свистков, расположенных по окружности

Такой простейший механический генератор ультразвука имеет существенный недостаток: его мощность мала. Для повышения мощности нужно увеличить поток воздуха и газа, протекающего через свисток. При этом возникают некоторые побочные явления, способствующие повышению ультразвуковой мощности свистка.

Струйный генератор ультразвука (иногда его называют по имени изобретателя — генератором Хартманна) показан на рис. 12, *а*. Через нижний патрубок *1* под давлением около 2,5 *атм* поступает воздух или газ. Сверху, над патрубком, находится полость *2* с острым краем *3*, о который разбивается воздушная струя. Металлическое кольцо *4* жестко скрепляет эти основные детали струйного генератора. Такой генератор может создавать ультразвуки в диапазоне частот от 4 до 60 *кгц* и отдавать до 100 *вт* звуковой мощности.

Ультразвуковые генераторы, так же как и любые другие генераторы, оцениваются по коэффициенту полезного действия (кпд), который в данном случае показывает, какой процент от всей затраченной на получение ультразвука мощности составляет мощность полученного ультразвука.

Струйный генератор имеет небольшой кпд (всего лишь несколько процентов). Однако он довольно часто применяется, так как прост, удобен в эксплуатации, дешев и не требует никаких специальных дополнительных приспособлений, работая от обычного компрессора или просто от баллона со сжатым воздухом. Излучение ультразвука таким генератором происходит более или менее одинаково во все стороны. Поэтому если хотят получить направленный ультразвуковой пучок, то помещают струйный генератор в фокусе вогнутого зеркала, аналогично тому, как для получения направленного светового пучка при помощи прожектора в фокусе зеркала ставят электрическую дугу или лампу накаливания (рис. 12, *б*).

Иногда для получения большей мощности соединяют несколько (3—6) свистков в батарею и снабжают ее рупором. На рис. 13, *а* показана схема такой батареи, а на рис. 13, *б* — ее внешний вид. Такая батарея может дать до 500 *вт* звуковой мощности в диапазоне частот 15—40 *кгц* при кпд около 10%. (Для ее питания требуется газ под давлением 3 *атм* при расходе 80 *м³/мин.*)

В ряде случаев, однако, ультразвук требуется получить не в воздухе, а в жидкости, например в воде. Было бы бесполезно для этой цели помещать струйный генератор или какой-нибудь другой источник ультразвука в воздухе над поверхностью воды, так как звуковые волны очень плохо проходят из воды в воздух и из воздуха в воду. Поэтому для получения в жидкости сколько-нибудь мощного ультразвука его нужно там же и возбудить. Для этой цели часто применяют прибор, который носит название жидкостного свистка (рис. 14). Принцип его действия такой же, как и воздушного свистка. Струя жидкости *5* под давлением подается через сопло *1* и по выходе из него разбивается о заостренный край пластинки *2*. При этом пластинка, закрепленная в точках *3*, приходит в колебательное движение и дает два пучка ультразвука *4*, направленных вверх и вниз, перпендикулярно к поверхности пластинки. Такой жидкостный свисток способен работать в диапазоне частот от 4 до 30 *кгц* и может дать несколько десятков ватт полезной мощности.

На ином принципе работают сирены, часто применяемые для получения мощных ультразвуковых колебаний в воздухе. Их устройство совершенно аналогично устройству обычной звуковой сирены. На рис. 15, *а* видны два металлических диска *1* и *2*, на периферии которых просверлен ряд отверстий *3*. Если один из дисков (ротор) начать вращать, то его отверстия будут совпадать с отверстиями неподвижного диска только в определенные моменты времени. Если на диски направить струю воздуха *4*, то в те моменты, когда отверстия совпадут, она будет проходить через диски. В остальное время путь для струи будет закрыт. Таким образом, после прохождения струи через диски вместо непрерывного потока воздуха получается ряд пульсаций, частота которых будет зависеть от количества отверстий в дисках и скорости вращения подвижного диска. Полученные таким образом пульсации являются источником мощных звуковых волн.

Современные ультразвуковые сирены (рис. 15, *б*) работают в диапазоне частот от 10 до 200 *кгц* и могут дать несколько киловатт полезной мощности при кпд 50—70%. Иногда вместо электромотора *5* для вращения ротора применяют воздушную турбину, которая питается тем же сжатым воздухом, что и сама сирена. Создаваемая

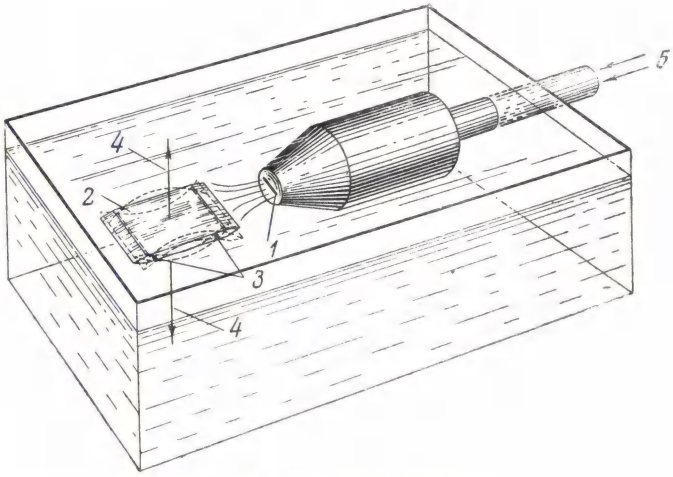
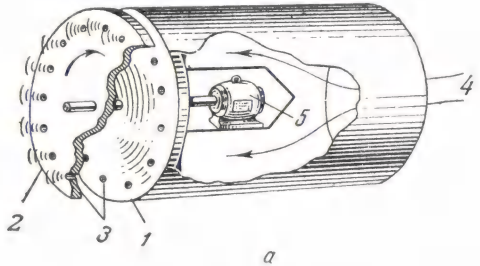
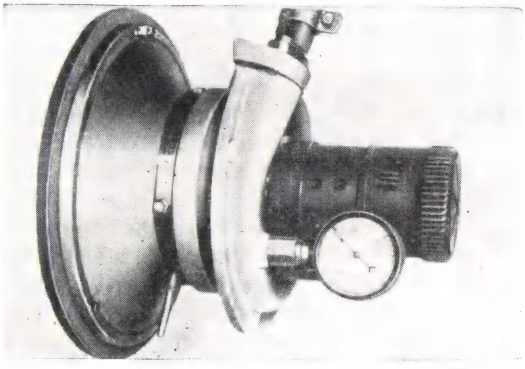


Рис. 14. Жидкостный свисток



а



б

Рис. 15. Ультразвуковая сирена:

а — схема сирены с электромотором; б — внешний вид современной сирены

воздушной сиреной интенсивность звука на выходе доходит до 10 *вт/см*^{2}.

Получение значительных мощностей в жидкости при высоком кпд представляется весьма заманчивым, так как большинство тех промышленных процессов, при которых ультразвук может быть применен с существенной пользой, проходит именно в жидких средах. Однако решение этой проблемы сопряжено с большими трудностями. В последнее время предложен ряд остроумных идей, над развитием которых сейчас работают ученые.

Подводя итоги, можно сказать, что существующие в настоящее время механические источники ультразвука просты, надежны и эффективны. Их недостатками являются: сравнительно низкая генерируемая частота (десятки или в лучшем случае сотни тысяч герц) и невозможность получения от таких генераторов больших мощностей ультразвука в жидкости.

Электромеханические излучатели

В электромеханических излучателях звук получается путем преобразования колебаний электрического тока соответствующей частоты в механические колебания излучателя. Следовательно, для приведения в действие электромеханического излучателя необходим переменный ток с частотой, соответствующей частоте ультразвука, который мы хотим получить.

Сама по себе задача получения переменного электрического тока любой мощности и частоты в настоящее время полностью разрешена. Генераторы переменного тока широко распространены в современной технике и дают ток от самой низкой так называемой промышленной частоты (50 *гц*) до самых высоких радиочастот (миллионы и миллиарды герц), применяемых в радиосвязи, телевидении, радиолокации. Существуют конструктивно разработанные и широко применяемые электрические генераторы необходимой мощности для всего интересующего нас диапазона ультразвуковых частот. Но эти генераторы сравнительно сложны в эксплуатации и дороги, коэффициент полезного действия их составляет 30—50%, поэтому стоимость электроэнергии повышенной частоты значительно выше, чем стоимость промышленной энергии.

Если добавить к этому, что кпд самих электромеханических преобразователей тоже не превышает 30—60%, то станет ясно, что ультразвуковая энергия, вырабатываемая электромеханическими излучателями, обходится значительно дороже, чем энергия механических источников. Кроме того, начальная стоимость самих электрических излучателей значительно выше, а вследствие большей сложности требуются высококвалифицированные работники для их обслуживания.

Однако электромеханические источники звука имеют ряд преимуществ: они позволяют получать ультразвуки очень высоких частот, более устойчивы в работе и их можно изготовить очень малых размеров (в несколько квадратных миллиметров).

Кроме того, электромеханические излучатели не имеют никаких вращающихся частей, не требуют применения газовых или жидкостных потоков и поэтому более удобны в эксплуатации.

Электромеханические излучатели могут быть разбиты на три группы: электродинамические, магнитострикционные и пьезоэлектрические. Эти группы различаются не только по принципу действия, но и тем диапазоном частот, в которых они могут применяться. Так, электродинамические излучатели работают в пределах до 30 *кгц*, магнитострикционные — от 5 до 150 *кгц* и пьезоэлектрические — от 100 *кгц* и выше.

Ультразвуковые электродинамические излучатели по принципу действия сходны с излучателями, применяющимися для воспроизведения звука в радиовещании и в звуковом кино, известными под названием громкоговорителей. Однако между требованиями, предъявляемыми к тем и другим, есть существенное различие. От громкоговорителей требуется неискаженная передача всей широкой полосы частот, соответствующей звукам речи и музыки. Для удовлетворения этого основного требования приходится жертвовать другими качествами, в частности чувствительностью и коэффициентом полезного действия.

У обычных громкоговорителей кпд составляет около 1%, т. е. только одна сотая подводимой к нему электрической мощности преобразуется в полезную звуковую энергию, остальные 99% энергии переходят в тепло.

Ультразвуковые излучатели работают, как правило, на одной частоте или, точнее, на очень узкой полосе частот. Такая «специализация» излучателя позволяет гораздо более рационально спроектировать его и сконструировать. В частности, удается реализовать такое замечательное свойство механических колебательных систем, как механический резонанс, в результате которого система может существенно увеличивать амплитуду колебаний в области определенной частоты, носящей название резонансной частоты данной системы.

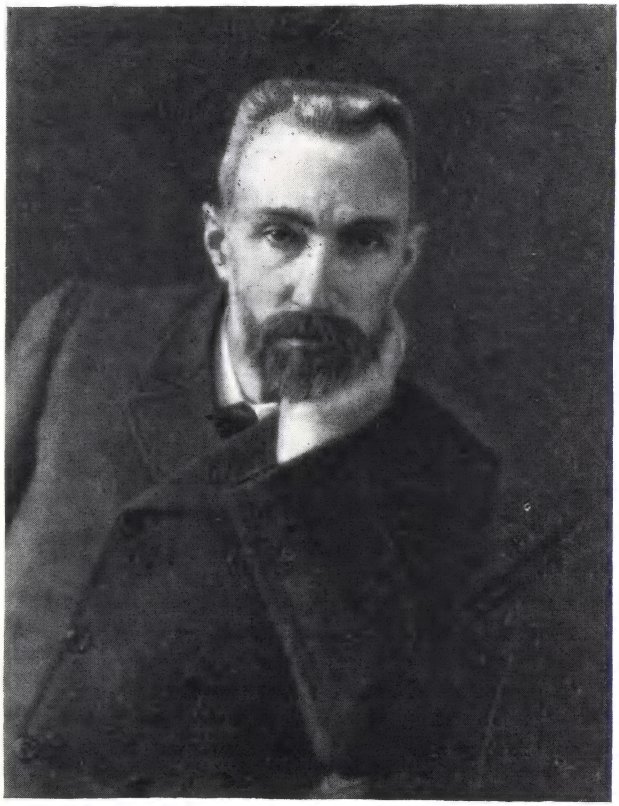
Поскольку резонансная частота колеблющегося тела зависит от его геометрических размеров и упругих свойств материала, из которого оно выполнено, что, варьируя эти величины, можно подобрать резонансную частоту излучателя так, как это нам нужно, и в результате добиться значительного повышения амплитуды колебаний, а следовательно, и излучаемой акустической мощности и кпд. Именно поэтому, в отличие от широкополосных громкоговорителей, кпд ультразвуковых узкополосных (резонансных) излучателей составляет от 30 до 70%, т. е. в полезную звуковую мощность переходит от трети до двух третей подводимой электрической мощности. В диапазоне частот 5—30 *кгц* они могут создавать интенсивность 1—2 *вт/см²*.

Для лабораторных исследований и полупромышленных испытаний чаще всего применяют пьезоэлектрические и магнитострикционные излучатели.

Явления магнитострикции и пьезоэлектричества известны довольно давно. Магнитострикцию обнаружил в 1847 г. английский ученый Р. Джоуль.

Открытие и исследование столь широко применяющегося в настоящее время явления пьезоэлектричества принадлежит знаменитым французским физикам братьям П. Кюри и Ж. Кюри (1880 г.).

Магнитострикция, так же как и обратный пьезоэлектрический эффект, заключается в том, что размеры тел, выполненных из некоторых материалов, могут изменяться под действием магнитного или соответственно электрического поля. Так, например, никелевая трубка уменьшает свою длину в сильном магнитном поле (магнитострикция), а пластинка, вырезанная из кристалла кварца, изменяет свои размеры, если ее поместить в электрическое поле (пьезоэлектрический эффект). Если



Пьер Кюри
(1859—1906)

электрическое или магнитное поле не постоянно по своей величине и меняется с определенной частотой, то с такой же частотой будут меняться и размеры тела, находящегося в этом поле. Меняя поле с частотой слышимых звуков, мы заставим это тело колебаться с частотой слышимых звуков и, следовательно, излучать слышимые звуки; меняя же поле с частотой ультразвуков, мы соответственно получим ультразвуковые колебания.

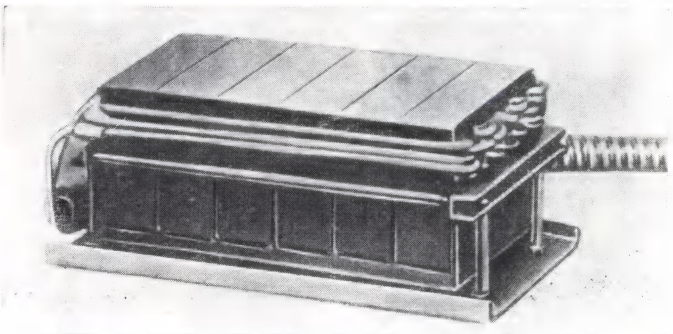


Рис. 16. Внешний вид магнитострикционного излучателя

Наилучшими материалами для магнитострикционных излучателей являются никель, нержавеющая сталь и некоторые сплавы, как, например, пермаллой и пермендюр. Для пьезоэлектрических излучателей чаще всего используется кварц, реже — фосфат аммония. В последнее время начинает получать широкое применение новый пьезоэлектрический материал — керамика титаната бария, полученный и исследованный под руководством члена-корреспондента Академии наук СССР Б. М. Вула.

Магнитострикционные излучатели чаще всего имеют вид стержней, сплошных или полых, с обмоткой, обтекаемой переменным током нужной частоты (рис. 16). Для получения сильных магнитных полей, а следовательно, и больших излучаемых мощностей нужен значительный ток при сравнительно малом напряжении. Часто для уменьшения потерь тело самого стержня набирается из тонких изолированных друг от друга пластин, подобно тому как это делается в обычных трансформаторах. Ин-

тенсивность, которую можно получить от магнитострикционного генератора, достигает нескольких десятков ватт с квадратного сантиметра при кпд 50—60%.

Кварцевые излучатели, способные генерировать ультразвуковые колебания самых высоких частот, в данной области имеют исключительное применение. Они чаще всего представляют собой вырезанную из кристалла пластинку (рис. 17), на противоположные поверхности которой нанесены тонкие металлические обкладки (электроды). На электроды накладывается напряжение переменного тока требуемой частоты.

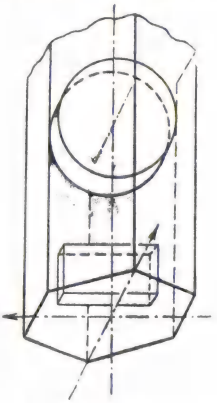


Рис. 17. Схема выреза пластины из кристалла кварца

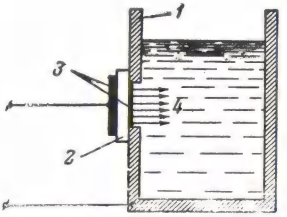


Рис. 18. Схема излучения ультразвука в жидкость:

1 — сосуд с жидкостью; *2* — пьезоэлектрическая пластинка; 3 — обкладки; *4* — ультразвуковой луч

В отличие от магнитострикционного, кварцевый излучатель требует больших напряжений при малых токах. В мощных излучателях эти напряжения достигают тысяч и даже десятков тысяч вольт. Одна или обе металлические обкладки непосредственно соприкасаются с той средой (чаще всего жидкостью), в которой нужно возбудить ультразвуковые колебания (рис. 18). Интенсивность ультразвуков, полученных в жидкости при помощи кварцевого излучателя, может достигать нескольких десятков ватт с квадратного сантиметра, в импульсном режиме она возрастает до нескольких сотен. На рис. 19 показан кварцевый излучатель высокой интенсивности.

Большие чистые кристаллы кварца встречаются не часто, поэтому в практике применяют обычно кварцевые пластинки диаметром 3—5 *см*. Общая мощность, которую можно получить от кварцевого излучателя, невелика, она лимитируется величиной поверхности кварцевой пластинки. Для увеличения рабочей поверхности применяют так называемую кварцевую мозаику, состоящую

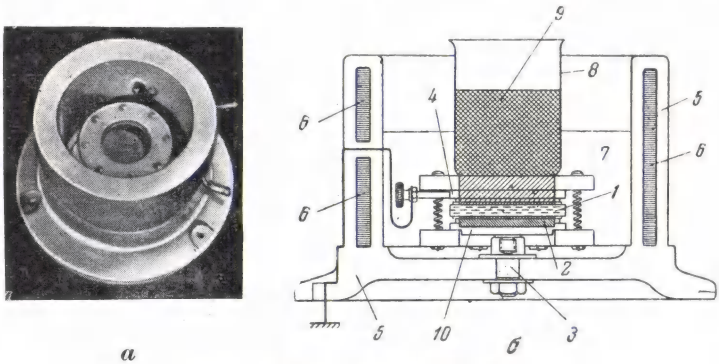


Рис. 19. Кварцевый излучатель:

а — внешний вид; б — схема.
1 — кварцевая пластина; 2 — нижний электрод; 3 — провод высокого напряжения; 4 — верхний электрод соединенный с корпусом и с землей; 5 — корпус; 6 — водяное охлаждение; 7 — промежуточная жидкость (трансформаторное масло); 8 — реакционный сосуд; 9 — обрабатываемая жидкость; 10 — изолирующая прокладка

из значительного количества небольших кварцевых пластин, точно прошлифованных и подогнанных друг к другу, составляющих как бы общую излучающую поверхность. Следует отметить, что идея применения пьезоэффекта, и, в частности, кварцевых излучателей для получения ультразвуковых колебаний принадлежит известному французскому физику П. Ланжевену, который своими исследованиями заложил фундамент науки об ультразвуке.

Новый пьезоэлектрический материал — титанат бария — синтетический продукт. Он может быть получен необходимых размеров и формы; кроме того, для получения одинакового эффекта при использовании титаната бария требуется значительно меньшее напряжение, чем в случае применения кварца. Недостатками этого материала являются его повышенный нагрев, обусловленный срав-

нительно большими механическими и диэлектрическими потерями, и невозможность работы при температурах, превышающих 80—90°. Это ограничивает интенсивность получаемого звука (3—5 *вт/см*^{2}).

В последнее время по типу титаната бария синтезирован ряд новых материалов с менее сильно выраженной температурной зависимостью, дающих меньшие потери.

Фокусирование ультразвуковых волн

Во многих случаях необходима значительно большая величина интенсивности ультразвука, чем та, которая может быть получена с единицы поверхности излучателя. Так, например, все процессы, требующие для своего развития наличия кавитации, идут при интенсивностях не меньших, чем 5—7 *вт/см*^{2}. В случае применения титаната бария эта интенсивность является предельной и приходится работать без всякого запаса. Существуют, правда, конструкции с использованием принудительного охлаждения, для которых интенсивность может быть несколько повышена, но сложность таких конструкций ограничивает область их применения. Кроме того, при больших интенсивностях звука кавитация, которая прежде всего возникает на границе жидкости и твердого тела и, следовательно, у поверхности излучателя, приводит к быстрому его разрушению. Для предотвращения этого вредного эффекта систему облучения нужно устроить таким образом, чтобы необходимая интенсивность получалась лишь в рабочей области, а у поверхности излучателя кавитация не возникала вовсе или была невелика. Этого можно достигнуть фокусировкой ультразвука.

Ультразвуковые волны можно фокусировать при помощи звуковых вогнутых зеркал и линз. Однако существует метод фокусирования ультразвука, который не применяется для световых лучей, а именно фокусирование вогнутым излучателем. Для этого поверхности излучателей придают форму части сферы (рис. 20) или цилиндра. Звуковые волны, излученные этой поверхностью, будут собираться вблизи центра сферы, в фокальном пятне, или соответственно вблизи оси цилиндра, в фокальной полосе. Таким путем легко получить усиление интенсивности в несколько десятков раз. Подбирая соответствующие размеры

и форму излучателя, можно получить такое звуковое поле, при котором кавитация будет возникать только в районе фокальной области и отсутствовать у поверхности излучателя и в прилегающей к ней части передающей среды (жидкости). При этих условиях поверхность излучателя не будет разрушаться ударами кавитационных пузырьков и в передающей среде не будут происходить дополнительные потери энергии, связанные с кавитацией. На рис. 21 изображены основные применяющиеся типы фокусирующих излучателей из титаната бария.

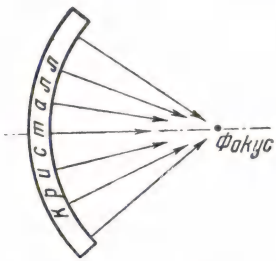


Рис. 20. Фокусирование ультразвуковых волн вогнутым излучателем

Сферические фокусирующие излучатели дают большую концентрацию звуковой энергии, но на небольшой поверхности; они применяются в тех случаях, когда объект, на который воздействует ультразвук, имеет небольшие размеры и не перемещается во время облучения.

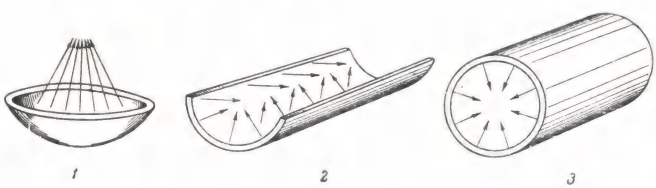


Рис. 21. Типы фокусирующих излучателей из титаната бария с поверхностью в виде:

1 — части сферы; 2 — части цилиндра; 3 — трубки

Цилиндрические излучатели дают меньшую концентрацию звуковой энергии, чем сферические, зато фокальная область вытянута в виде полосы, длина которой равна длине цилиндра. Эти излучатели удобны в тех случаях, когда облучение объектов производится в режиме потока: деталь, подлежащая обработке ультразвуком, по конвейеру проходит вдоль всей фокальной области цилиндрического отрезка. Рядом с первым излучателем можно поместить второй или же несколько излучателей подряд так, чтобы деталь могла проходить вдоль фокальной полосы всех цилиндров.

Так увеличивается длительность облучения. Такая схема получила распространение, в частности, при ультразвуковой очистке и обезжиривании мелких деталей.

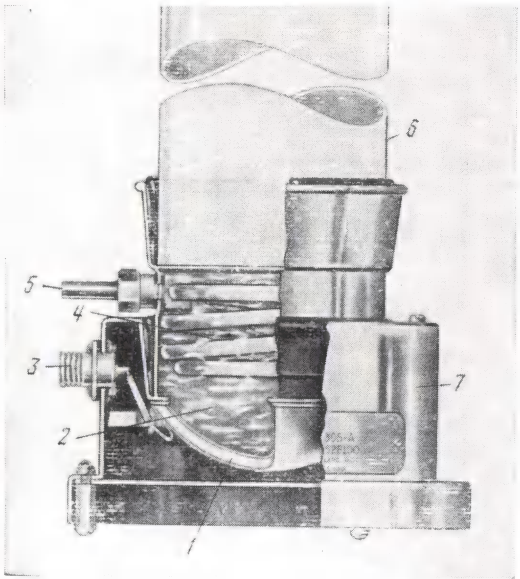


Рис. 22. Конструкция фокусирующего излучателя из титаната бария:

1 — сферическая излучающая пластина; *2* — промежуточная жидкость; *3* — подвод электрического напряжения; *4* — змеевик охлаждения; *5* — подача охлаждающей воды; *6* — реакционный сосуд; *7* — корпус

Поскольку фокусирование требует применения высоких частот, то магнитострикционные излучатели, работающие на низких ультразвуковых частотах, как правило, непригодны, и поэтому фокусирующие излучатели почти всегда выполняются из керамики титаната бария, реже из кварца (рис. 22).

Если условия работы требуют получения больших интенсивностей на низких частотах, применяют компоновку нескольких плоских магнитострикционных излучателей, оси которых направлены в одну точку. Такая комбинация может рассматриваться как своеобразная

фокусирующая система. В качестве примера на рис. 23 показана установка для очистки внешней поверхности длинных труб или стержней. Она представляет собой

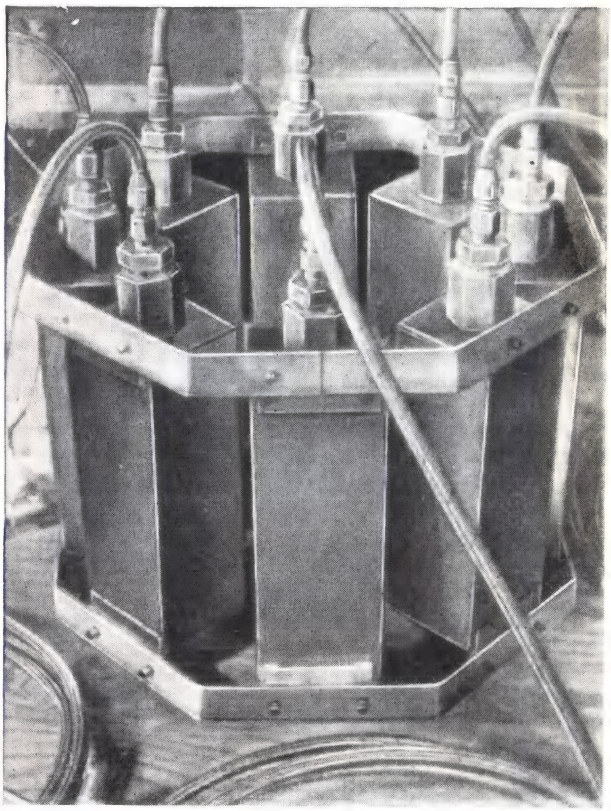


Рис. 23. Наборный восьмиугольный магнитострикционный излучатель

восемь плоских прямоугольных магнитострикционных излучателей, образующих правильный восьмиугольник. Вся эта батарея погружается в ванну с соответствующей жидкостью, а подлежащая очистке труба протягивается вдоль оси такого «цилиндрического», точнее, призматического излучателя. Разумеется, концентрация энергии

у такого излучателя гораздо ниже, чем она была бы у настоящего цилиндра. Однако такая конструкция настолько проще трубчатого магнитострикционного излучателя, что это окупает некоторую потерю энергии.

Коэффициент полезного действия керамических излучателей составляет около 50%, это значит, что половина подводимой энергии обращается в тепло. Поэтому при промышленном применении таких излучателей технологический процесс проектируется так, чтобы это тепло подогревало ванну с рабочим раствором, доводя его до необходимой температуры. Если же количество выделяющегося тепла оказывается бóльшим, чем это нужно, то излучатель снабжается системой водяного охлаждения.

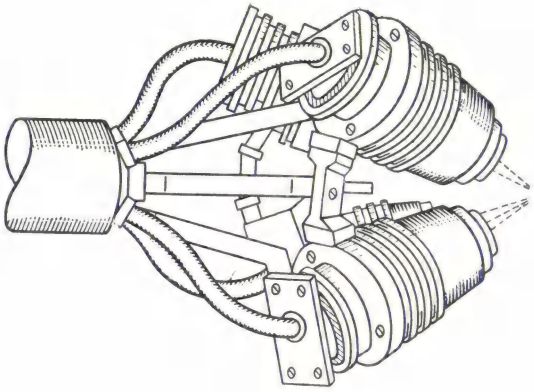
Мощная ультразвуковая волна, распространяющаяся от ультразвукового излучателя, помещенного в сосуд с водой, создает фонтан. Если же эти звуковые лучи сфокусировать и совместить фокус с поверхностью жидкости, то струя фонтана получится высокой и тонкой.

В тех случаях, когда нужно облучать большие количества жидкостей, удобнее всего применять излучатели в виде трубок, через которые можно пропускать обрабатываемую жидкость.

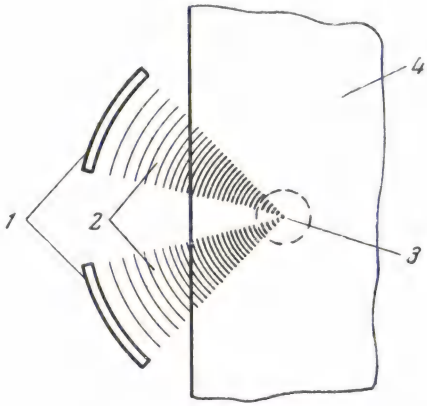
Получение очень высоких интенсивностей

Используя принцип фокусирования ультразвуковых волн, можно получать очень большие интенсивности звуковой энергии. Для этого нужно на небольшой площади фокального пятна собрать всю энергию, создаваемую излучателем с большой поверхностью. Диаметр фокального пятна приблизительно равен длине звуковой волны и, следовательно, тем меньше, чем выше рабочая частота. Поэтому большие интенсивности легче получить на высоких частотах. Проектирование и постройка фокусирующих излучателей, предназначенных для получения очень высоких интенсивностей, представляет собой сложную задачу, при решении которой приходится учитывать много различных соображений.

На рис. 24 показаны внешний вид и принцип действия разработанного в США фокусирующего излучателя, предназначенного для так называемой безножевой хирургии, т. е. для поражения ультразвуком определенных участков



а



б

Рис. 24. Счетверенный кварцевый фокусирующий излучатель для безножевой хирургии:

а — внешний вид; б — принцип действия.
1 — вогнутые излучающие пластинки; 2 — сходящиеся ультразвуковые пучки; 3 — зона поражения мощным ультразвуком; 4 — обрабатываемая ткань

живой ткани без какого бы то ни было нарушения функционирования тканей, окружающих этот участок. Излучатель состоит из четырех кварцевых сферических фокусирующих пластин, фокусы которых совмещены в одной точке пространства. Только в фокальном пятне получается такая интенсивность, какая требуется, чтобы разрушить интересующий нас участок ткани. По пути к фокусу звуковые волны еще не обладают такой большой интенсивностью и проходят через ткани, находящиеся сверху, не разрушая их.

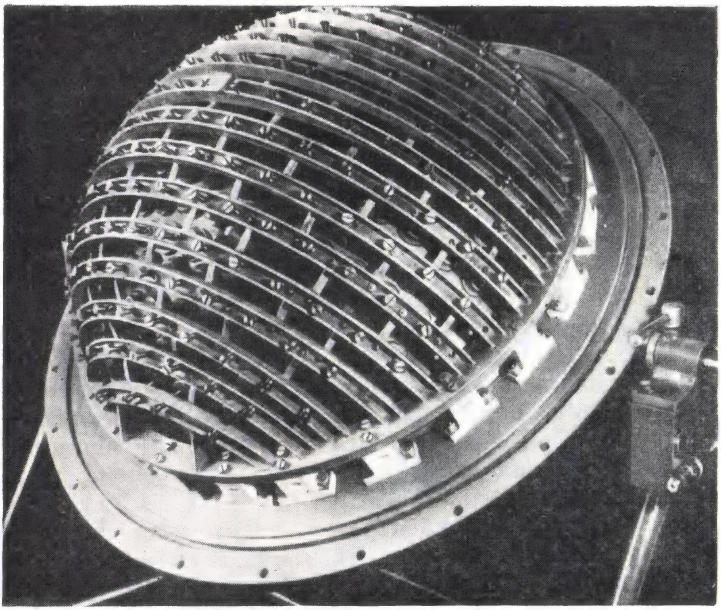
Работая в частоте около 1 *Мгц*, в фокальном пятне удается получить интенсивность, достигающую 1000 *вт/см*^{2}, что соответствует амплитуде переменного давления 55 *атм*; при этом в фокусе получаются ускорения, превышающие в 2,5 миллиона раз ускорение, создаваемое земным тяготением.

Иначе устроен концентратор, разработанный для исследования действия мощных ультразвуков на вещество и на живые ткани в Акустическом институте АН СССР. Здесь основным фокусирующим излучателем ультразвука является тонкая алюминиевая полусфера диаметром около 600 *мм* (рис. 25), возбуждаемая с наружной стороны пришлифованными к ней кварцевыми тоже сферическими пластинками; всего таких кварцевых пластинок 220.

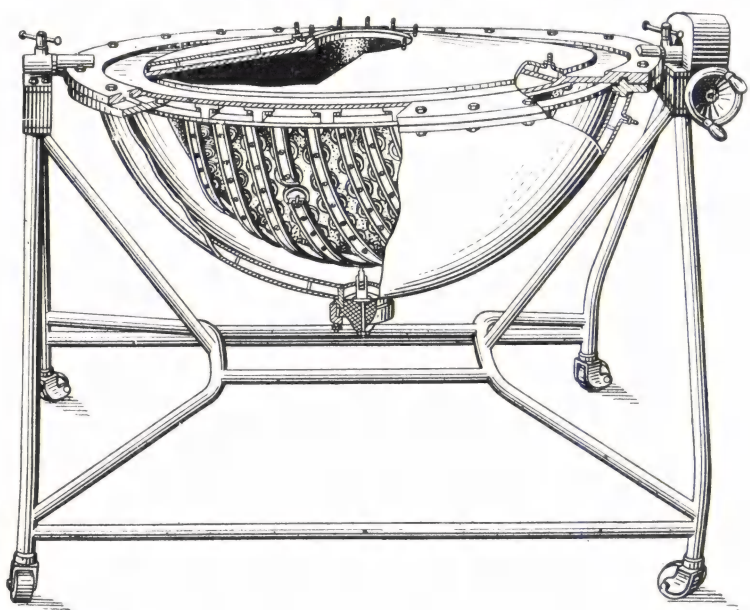
Снаружи эти кварцевые пластинки прижимаются специальной «фермой», осуществляющей одновременно и функции подвода электрического напряжения к каждой кварцевой пластинке. Для большей электрической прочности и лучшего отвода тепла все устройство, в котором размещена ферма с пластинками, заполнено трансформаторным маслом, охлаждаемым в свою очередь водой, циркулирующей в наружном полом кожухе.

Внутри алюминиевой полусферы находится дестиллированная и тщательно дегазированная (для уменьшения поглощения) вода, являющаяся вспомогательной рабочей жидкостью, в которой происходит процесс концентрации звуковой энергии.

Основная рабочая жидкость, заполняющая пространство вблизи фокуса, находится в специальном цилиндрическом патрубке и отделена от воды, во избежание загрязнения последней, тоненькой пленочкой.



а



б

Рис. 25. Мощный концентратор ультразвука:

а — основной узел мощного концентратора ультразвука — полусферическая пластина и возбуждающие ее кварцевые пластинки; б — внешний вид собранного концентрата

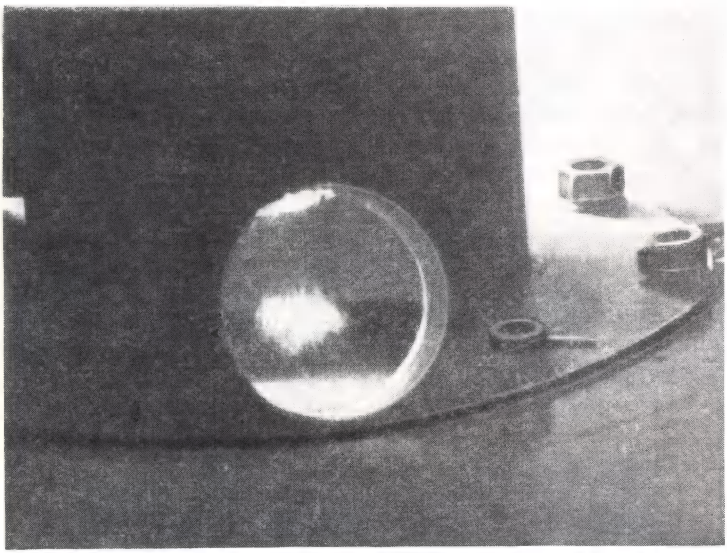


Рис. 26. Фотография кавитационного облачка в фокусе мощного концентратора

Цилиндрический патрубок для наблюдения процессов, происходящих в фокусе, имеет два окна. На рис. 26 помещен фотографический снимок развивающейся в фокусе кавитации. Диаметр фокального пятна в этом концентраторе равен 3 *мм*. На площади фокального пятна была получена средняя интенсивность 7000 *вт/см*^{2}, а в центре — около 20 000 *вт/см*^{2}, что приблизительно соответствует амплитуде звукового давления свыше 200 *атм*. Есть основания предполагать, что интенсивность в центре при работе этого концентратора в нормальном режиме может быть значительно увеличена.

Давление, создаваемое описанным концентратором в центре фокального пятна, в 400 миллионов раз превосходит среднее давление, развиваемое голосовым аппаратом человека при нормальном разговоре на расстоянии 1 *м*.

Концентрация низкочастотных вибраций

Ультразвуки низких частот (15—60 *кгц*) с трудом поддаются фокусировке. Точнее говоря, для их фокусирования нужны линзы, зеркала или фокусирующие излучатели очень больших размеров, диаметром в несколько метров, что в большинстве случаев затруднено практически.

Из этого, однако, не следует, что ультразвуки низких частот нельзя концентрировать. В некоторых частных случаях это оказывается возможным. Для уяснения физического смысла происходящих при этом физических процессов рассмотрим распространение звуковой волны в очень длинном металлическом слегка суживающемся стержне. Так как мы уже знаем, что ультразвуковые колебания не проходят через границу воздух — металл, то для нас ясно, что не будет никаких утечек энергии, т. е. что



Рис. 27. Типы концентраторов

вся вводимая в стержень мощность будет распространяться вдоль его оси. Поперечное же сечение стержня все время уменьшается. Поэтому мощность, протекающая через единицу поперечного сечения (а это, как мы знаем, и есть интенсивность звука), будет все время нарастать.

Расчет показывает, что наиболее выгодными формами стержня являются экспоненциальная (рис. 27, *а*) и ступенчатая (рис. 27, *б*). Эффект концентрации можно еще больше повысить, если подобрать длину стержня (который носит название концентратора) так, чтобы она была равна одной, двум или трем длинам полуволны. Такая система будет резонансной и интенсивность, а следовательно, и амплитуда колебаний на конце такого концентратора может быть доведена до предела, определяемого только прочностью материала. Большинство применяемых для этой цели материалов (например, сталь) в диапазоне частот 15—60 *кгц* позволяет получать амплитуду колебаний на конце концентратора около 0,1 *мм*. Для частоты, напри-

мер, 20 *кгц* это соответствует колебательной скорости 200 *см/сек* и ускорению, в 25 тысяч раз превышающему ускорение, создаваемое земным тяготением.

Такие концентраторы получили широкое применение для ультразвукового резания, сварки и ряда других технологических процессов.

Обнаружение ультразвуковых волн

Поскольку ультразвуковые волны не воспринимаются нашим органом слуха, то для обнаружения ультразвука приходится пользоваться другими методами. Для суждения о наличии ультразвука и для очень приближенной оценки его интенсивности можно воспользоваться внешними проявлениями ультразвука (например, эффектом фонтанирования). Для более точного измерения можно применять радиометр.

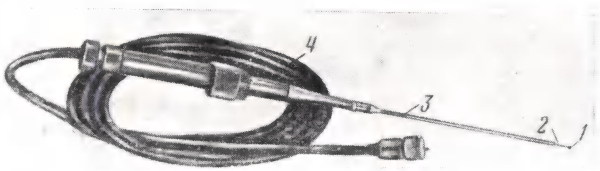


Рис. 28. Внешний вид термоакустического измерителя интенсивности ультразвука:
1 — шарик из поглощаемого материала; 2 — термопара; 3 — экранирующая трубка; 4 — соединительный кабель

Мы уже знаем, что поглощающие звуковую энергию тела нагреваются, так как поглощенная звуковая энергия переходит в тепловую. Этим явлением можно воспользоваться также для обнаружения и измерения мощных ультразвуковых волн. Для этой цели обычно применяют маленький (1—2 *мм*) шарик из какого-нибудь вязкого, хорошо поглощающего звук вещества, например смолы, пицеина или резины. Степень нагрева шарика в звуковом поле будет определяться интенсивностью поля в данной точке: чем больше интенсивность, тем сильнее нагревается шарик. Хотя часть тепла будет уходить на нагрев омывающей шарик жидкости, все же через некоторое время (практически несколько секунд) установится тепло-

вое равновесие, и шарик нагревается до вполне определенной температуры. Эта температура может быть измерена помещенной в шарик миниатюрной термопарой. На рис. 28 показан внешний вид термоакустического щупа. Достоинствами такого метода измерения являются его простота и небольшие размеры щупа, позволяющие очень детально снимать картины сложных полей. Недостатки метода — сравнительно малая чувствительность и зависимость этой чувствительности от частоты (коэффициент поглощения звука зависит от частоты).

Впрочем, малая чувствительность — недостаток, свойственный всем трем описанным выше методам, обусловленный тем, что все эти три метода опираются, в сущности говоря, на вторичные эффекты (рябь, радиационное давление, нагрев), а не на основные. Основным эффектом, характеризующим ультразвуковое поле, является переменное звуковое давление, величина которого всегда значительно больше, чем величина радиационного давления. Так, например, в воде для звука интенсивностью 1 *вт/см*^{2} радиационное давление равно 0,13 *г/см*^{2}, тогда как амплитуда звукового давления достигает 1,7 *атм*, что соответствует 1700 *г/см*^{2} и, следовательно, превосходит радиационное давление в 13 тысяч раз. Почему же крылышко, реагируя на столь слабое радиационное давление, не чувствует звукового давления? Потому что радиационное давление действует постоянно, а звуковое давление меняет свой знак с частотой десятков и сотен тысяч, а то и миллионов герц. Инерция крылышка при всей его легкости не позволяет ему следовать за столь быстрыми изменениями давления, и крылышко остается на месте.

Такие быстропеременные давления удобнее всего обнаружить и измерить, используя пьезоэлектрический (или обратный магнитострикционный) эффект, особенно если настроить приемник в резонанс с частотой падающей волны. Тогда на обкладках пьезоэлектрической пластинки появится переменное напряжение, частота которого будет равна частоте падающей волны, а амплитуда — пропорциональна звуковому давлению принимаемого сигнала. Правда, развивающиеся на обкладках приемного пьезоэлемента электрические напряжения очень малы — это десятки или сотни микровольт, но современная электроника позволяет легко обнаружить слабый сигнал и

достаточно точно его измерить. На рис. 29 показана схема устройства такого приемника. Первые каскады усиления находятся в непосредственной близости от самого элемента. Эти приемники имеют значительно большую чувствительность и позволяют обнаруживать и измерять звуковые давления в несколько бар, что соответствует интенсивности в 10^{-10} *вт/см*^{2}.

Размеры таких приемников могут колебаться в самых широких пределах. Особенно любопытны сверхминиатюрные приемники, предназначаемые для исследования тонкой структуры сложных звуковых полей.

На рис. 30, *а* показан с увеличением в 50 раз такой микроприемник, разработанный в Акустическом институте АН СССР. Его диаметр составляет всего лишь 120 *мк*. На рис. 30, *б* схематически показано его устройство. Тонкая (0,02 *мм*) платиновая проволочка запаивается в тонкий стеклянный капилляр. Кончик проволоки сплавляется на пламени газовой горелки до формы шарика нужного диаметра, являющегося внутренним электродом приемника. На поверхность шарика наносится тонкий слой порошка титаната бария, который затем спекается до тех пор, пока не получится тончайшая (0,05 *мм*) оболочка, равномерно покрывающая шарик. Внешним электродом является тонкий слой серебра, который наносится на шарик и на стеклянный капилляр.

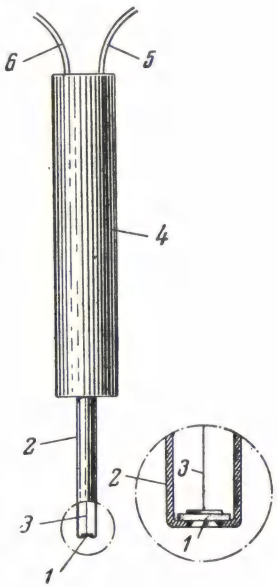
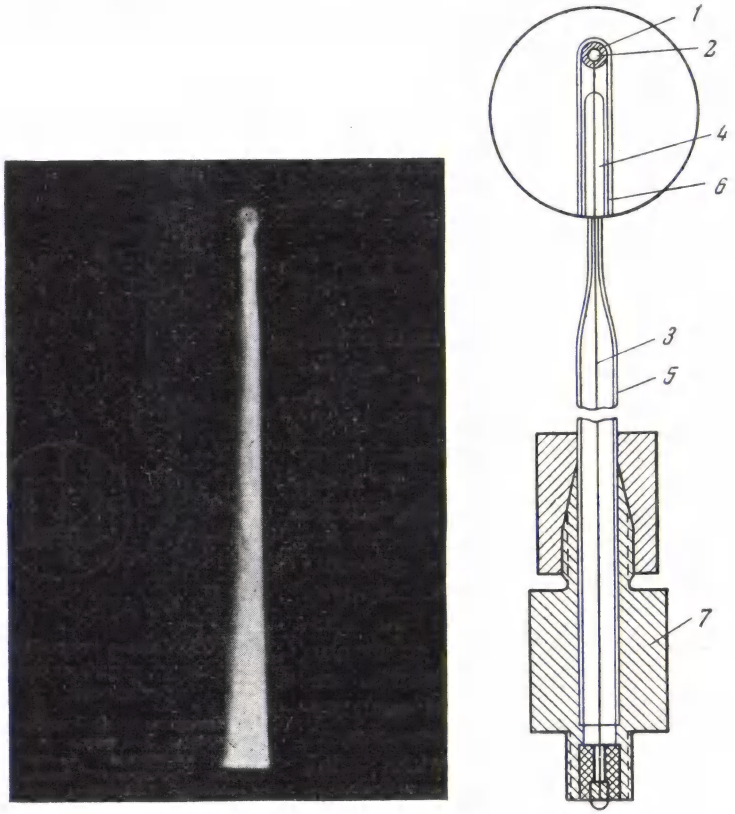


Рис. 29. Схема устройства пьезоэлектрического приемника:

1 — кристалл; 2 — трубочка-держатель; 3 — вывод от заднего электрода; 4 — экран, внутри которого находится усилитель; 5 — кабель питания усилителя; 6 — вывод измеряемого напряжения

Однако приемники с открытым пьезоэлементом нельзя применять в тех случаях, когда может возникнуть кавитация. Удары захлопывающихся кавитационных пузырьков быстро разрушают хрупкий пьезоэлемент. Большинство

активных применений ультразвука, как уже говорилось выше, основано именно на использовании кавитации. Измерение звукового поля здесь особенно необходимо для контроля правильности технологического режима. В этих



а *б*

Рис. 30. Сверхминиатюрный пьезоэлектрический приемник:

а — внешний вид; б — схема.

1 — оболочка из титаната бария; 2 — платиновый шарик; 3 — платиновая проволочка — вывод; 4 — стеклянный капилляр; 5 — стеклянная трубка; 6 — наружный серебряный экран; 7 — патрон-держатель

случаях можно применять так называемые волноводные щупы. Идея устройства таких щупов заключается в том, что в кавитирующую жидкость вводится конец волновода—

тонкого металлического стержня (рис. 31). Колебания в жидкости, воспринимаемые концом стержня, возбуждают ультразвуковые волны, которые бегут по стержню (отсюда его название — волновод). На другом конце волновода, выведенном за пределы жидкости, находится приемный пьезо- или магнитострикционный элемент, преобразующий приходящие волны в электрический сигнал.

Весь волновод, кроме самого кончика, изолируется воздушной рубашкой от жидкости. Это делается для того,

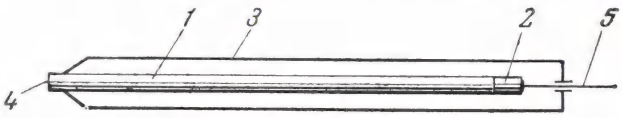


Рис. 31. Устройство волноводного щупа:

1 — металлический стержень-волновод; 2 — пьезоэлектрический чувствительный элемент; 3 — изолирующая рубашка; 4 — принимающий кончик; 5 — вывод напряжения от чувствительного элемента

чтобы на приемный элемент воздействовали только волны, соответствующие колебаниям конца волновода, и не воспринимались колебания жидкости, омывающей его боковую поверхность.

Ультразвуковые приемники используются не только для измерения и исследования звукового поля. Во всех случаях, когда ультразвук применяется как контрольно-измерительное средство, нас интересует изменение ультразвукового сигнала, прошедшего через исследуемую среду или изделие, по сравнению с посланным сигналом.

В таких случах приемник предназначен для восприятия этого прошедшего сигнала, и по показаниям индикатора, стоящего на его выходе, мы можем судить о наличии или отсутствии интересующих нас изменений. Обычно излучатель и приемник выполняются одинаковыми и располагаются так, чтобы посланный излучателем сигнал, после прохождения через исследуемый объект, попал в приемник. В некоторых случаях при работе в импульсном режиме, как, например, в гидролокации, дефектоскопии и др., один и тот же пьезоэлемент или магнитострикционный пакет используется поочередно сначала как излучатель, а затем как приемник отраженного эхо-сигнала.

ГЛАВА

III

Ультразвук — наблюдатель и контролер

Процесс распространения ультразвуковых волн определяется только материальными свойствами среды — ее плотностью, упругостью, вязкостью, внутренними механическими напряжениями, перемещением отдельных участков этой среды и т. д. Любое, самое малое изменение свойств прежде всего скажется на условиях распространения звуковой волны. Вместе с тем ультразвуковые волны малой интенсивности, распространяясь в какой-либо среде, не вызывают сами по себе никаких остаточных изменений в ней, так как уплотнения и разрежения, связанные с прохождением ультразвука, ничтожно малы. Поэтому все материальные свойства или их изменения можно исследовать и мерить при помощи ультразвуковых (или звуковых) волн, посылая их через исследуемую среду и наблюдая затем изменения, которые претерпевает волна. Акустические методы контроля состояния среды и измерения свойств вещества оказываются очень удобными, так как они достаточно точны, быстры и, что самое главное, не нарушают структуру исследуемого образца или ход исследуемого процесса; они не требуют взятия специальных проб, а могут производиться «на месте» — в реакторе, в тигле, на работающей детали или конструкции, при любых температурах и давлениях.

Определяя скорость распространения ультразвуковых волн и их затухание, можно определять интересующие нас свойства среды. Так, например, в однородной среде скорость распространения звука зависит как от плотности этой среды, так и от ее упругости. Самые незначительные примеси, например следы углекислоты или водяных паров в воздухе, могут заметно изменить величину скорости распространения звуковых волн. Величина поглощения ультразвука при его распространении также зависит от свойств среды и, кроме того, от частоты колебаний. Эти свойства ультразвука позволяют с успехом применять его для контроля состояния и определения структуры различных сложных сред, не разрушая их и не нарушая их структуры, а возможность получения тонких, остронаправленных ультразвуковых пучков позволяет проводить этот контроль в строго определенном направлении.

Быстродействие акустических методов и объективный характер индикации дает возможность использовать акустические приборы в качестве первичных датчиков в системах телеуправления и автоматического регулирования технологических процессов.

Контроль за ходом процессов

И скорость распространения ультразвуковых волн, и их поглощение существенно зависят от свойств среды, в которой они распространяются. А так как эти величины сравнительно легко поддаются экспериментальному определению, то, измеряя их, можно судить о свойствах и состоянии среды. На рис. 32 показана простейшая схема установки для быстрого измерения скорости распространения и поглощения ультразвука. В сосуде, в котором находится или через который протекает интересующее нас вещество, расположены друг против друга излучатель и приемник ультразвуковых волн. Если каким-либо способом измерить промежуток времени τ, который требуется ультразвуковому импульсу для прохождения от излучателя до приемника, то, зная расстояние D между ними, легко определить скорость звука $c = D/\tau$. С увеличением скорости ультразвука в исследуемой среде прошедший через нее импульс придет быстрее, при уменьшении скорости он несколько

запоздает (рис. 33, *1* и *2*). Степень ослабления ультразвукового импульса, прошедшего через исследуемую среду, по отношению к контрольному импульсу постоянной интенсивности будет мерой затухания (рис. 33, *3* и *4*). Такая простейшая установка позволяет решить ряд задач. Пусть, например, в баке происходит процесс экстрагирования дубильного вещества из коры. Процесс этот можно

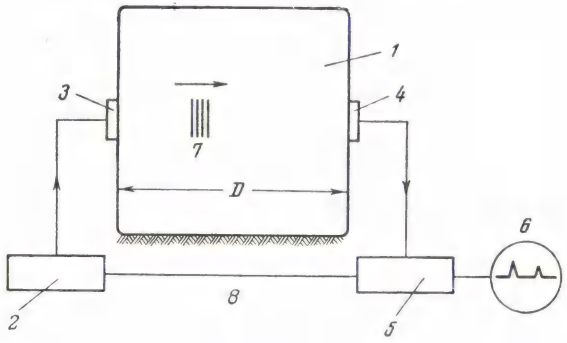


Рис. 32. Схема установки импульсного измерения скорости и поглощения ультразвука:

1 — сосуд; 2 — генератор электрических импульсов ультразвуковой частоты; 3 — излучатель; 4 — приемник; 5 — усилитель; 6 — электронный осциллоскоп; 7 — ультразвуковой импульс «в пути»; 8 — провод передачи контрольного импульса

считать законченным тогда, когда в раствор перейдет определенное количество данного экстракта. Этот момент обычно устанавливают химическим анализом последовательно взятых проб. Каждый такой анализ требует много времени, а взятие пробы иногда сильно затруднено или даже невозможно (при очень высоких температурах и давлениях в очень активных средах и т. д.). Для анализа с применением ультразвука нужно только заранее прокалибровать установку, измерив предварительно скорость и затухание ультразвука в растворах с различным содержанием экстракта. Так как сам процесс определения скорости и поглощения совершается очень быстро, то мы получаем возможность практически непрерывно следить за ходом процесса. Очень часто оказывается возможным ограничиться измерением только какой-либо одной величины, например скорости распространения.

Если объект анализа (примесь) известен заранее — акустические методы позволяют не только обнаружить ее наличие, но и устанавливать количественное содержание этой примеси.

В качестве примера рассмотрим определение наличия в шахтной атмосфере взрывоопасного рудничного газа — метана. Известно, что уже очень небольшое содержание

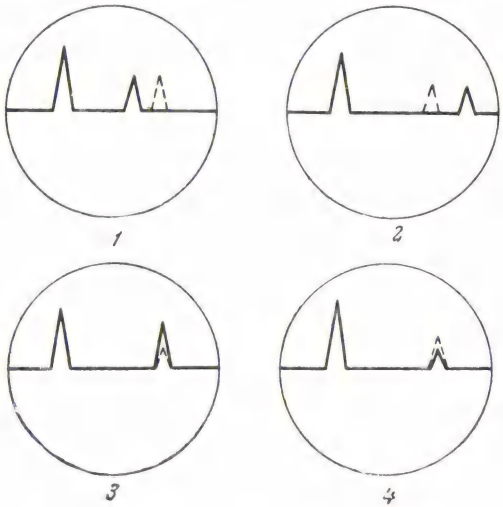


Рис. 33. Изображение на экране осциллоскопа импульсной установки:

1, 3 — контрольный импульс 2, 4 — импульс, прошедший через исследуемую среду

этого газа может привести к взрывам и пожарам в шахтах и рудниках. Поэтому очень важно иметь надежный способ обнаружения даже малых количеств метана, причем соответствующая аппаратура должна быть очень легкой, портативной, быстродействующей и не требующей высокой квалификации того, кто с ней работает. Обычные методы химического анализа для этой цели, конечно, непригодны. Применение ультразвука позволило решить эту задачу.

Прибор для определения метана создан Центральной научно-исследовательской лабораторией Госгортехнадзора РСФСР. Здесь сравниваются условия распространения

ультразвука через исследуемый воздух и через тот же воздух, очищенный от метана при помощи специального химического фильтра. Рабочая частота прибора — 300 *кгц*. Он позволяет определять содержание метана в пределах 0—5%, с погрешностью не более 0,1%. Внешний вид прибора показан на рис. 34. Резиновая груша предназначена для сбора анализируемого воздуха. Процентное

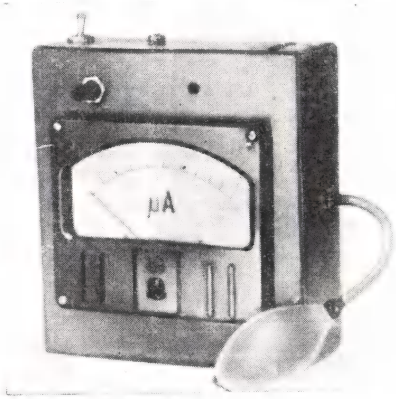


Рис. 34. Прибор для определения содержания метана в воздухе

содержание метана указывается стрелкой непосредственно на шкале. В несколько измененном виде прибор может быть использован в качестве исходного датчика стационарной системы автоматической газовой защиты. Само собой разумеется, что прибор может быть использован и для контроля содержания других газов; для этого нужно лишь сменить химический фильтр на другой, поглощающий нужный газ.

Ультразвуковые колебания применяются для исследования изменения состояния не только жидкостей и газов, но и твердых тел. Так, например, пропуская звуковой пучок через бетонную кладку, можно непрерывно наблюдать за процессом ее отвердевания и увеличения прочности. Это особенно ценно потому, что позволяет изменять упругие и прочностные свойства бетона не разрушая его, как

это делалось до сих пор. Кроме того, измерение производится не на образце, а на самой кладке, что исключает возможность случайных ошибок.

Вследствие сравнительно большого затухания звуковых колебаний в бетоне, для контроля его чаще используются не ультразвуки, а колебания слышимых частот. Однако это обстоятельство не должно смущать нас, так как мы знаем, что между высокими звуковыми и низкими ультразвуковыми колебаниями нет никакой разницы (кроме слышимости их человеческим ухом, что в данном случае не имеет никакого значения).

Совсем недавно было обнаружено, что условия распространения звуковых колебаний в металле зависят от степени его механического напряжения. Таким образом, есть надежда создать прибор, который будет измерять механические напряжения в работающих деталях и конструкциях под нагрузкой, что до сих пор являлось, как правило, невыполнимым, несмотря на то, что это единственный способ проверить расчеты конструкции и выявить запасы (или недостатки) прочности.

Не менее существенным вопросом является своевременное определение так называемой усталости металлов, когда резко снижаются их прочностные свойства. По-видимому, и здесь ультразвук поможет инженерам: усталость связана с изменениями кристаллической решетки металла, и опыты показали, что такое изменение структуры влияет на условия прохождения ультразвуковых колебаний и, следовательно, может быть выявлено.

Измерение скорости потока

Ультразвук может быть применен для измерения скорости потоков жидкостей и газов. Для этого по направлению потока, на некотором расстоянии друг от друга, располагают два ультразвуковых вибратора (рис. 35). Пошлем, например, первым вибратором короткий ультразвуковой импульс и, приняв его вторым вибратором, определим время t_1, необходимое этому импульсу для прохождения расстояния D между вибраторами. Так как звук распространяется по направлению потока, то скорость его складывается из скорости звука c в данной среде и скорости потока v. Отсюда ясно, что измеренное время связано

с приведенными выше величинами простым соотношением $t_1 = \frac{D}{c+v}$. Если теперь послать импульс вторым вибратором, а принять первым, то скорость прохождения сигнала в этом случае будет равняться $c - v$ (так как звук идет навстречу потоку) и время прохождения второго импульса будет $t_2 = \frac{D}{c-v}$. Измерив t_1 и t_2 и зная расстояние D,

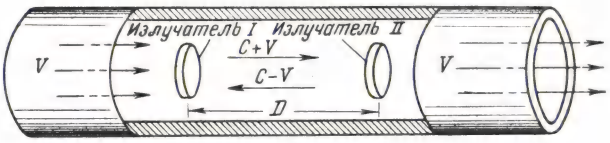


Рис. 35. Схема ультразвукового расходомера

из приведенных двух уравнений легко определить искомую скорость потока v. Существенно то, что результат измерений не зависит от скорости звука c, которая может меняться от температуры, состава жидкости или газа и других обстоятельств, не всегда поддающихся точному измерению.

Преимущество этого способа по сравнению с обычно принятыми расходомерами (например, водомерами) — его практическая безынерционность, позволяющая измерять быстроизменяющиеся скорости. С одной стороны, это повышает точность учета количества жидкости, перемещающейся с переменной скоростью, с другой — позволяет следить за изменениями самой скорости переменных процессов. Акустический расходомер получил практическое применение для определения расхода воды в камерах мощных водяных турбин больших гидростанций.

Регистрация микрометеоров в космическом пространстве

Для решения поставленной задачи по контролю или измерению мы посылали в исследуемое пространство возбужденные при помощи специальных приспособлений ультразвуковые лучи или волны и, принимая их, судили

по степени их изменения о структуре и свойствах среды, через которую они прошли. Но бывают случаи, когда сам исследуемый процесс создает звук или шум, так сказать, подает свой «голос». Тогда, исследуя этот «голос», можно судить о характере данного процесса.

В качестве примера рассмотрим одну из важнейших задач, выдвигаемых современной космонавтикой — изучение микрометеоров, движущихся в космическом пространстве. Встреча с микрометеорами может грозить неприятностями даже при малых их размерах, так как энергия, выделяемая в момент удара, пропорциональна не только массе, но и квадрату скорости, которая у космических кораблей должна быть очень большой. Но никаких сведений о плотности и частоте микрометеоров, а также об их распределении по размерам, до самого последнего времени не имели. Лишь запуски спутников и космических ракет проливают свет на этот важный вопрос.

Прислушиваясь к шуму дождя, барабанящего по железной крыше, можно получить представление о его силе и величине капель: крупные грозовые капли создают шум, не похожий на шум мелкого дождика. И уж конечно совсем своеобразный стук свойствен граду. По «голосу» атмосферных осадков можно судить об их характере.

Основной частью установки для регистрации микрометеоров являются пьезоэлектрические приемники, прикрепленные изнутри к внешней оболочке спутника или ракеты. Эти приемники воспринимают шум, возникающий от ударов метеорного дождя по оболочке. Вследствие больших скоростей движения метеоров, эти шумы лежат главным образом в ультразвуковом диапазоне частот.

Сигналы, зарегистрированные приемниками при помощи телеметрической аппаратуры, передаются на земные приемные пункты.

Расшифровка принятых сигналов показала, что «метеорная опасность», по-видимому, менее страшна, чем это предполагали. Метеорные частицы с массой 0,001 *г* встречаются в среднем один раз в десятки лет, а более крупные — еще реже.

Теперь, когда на землю благополучно возвратился корабль-спутник «Восток», на борту которого впервые в мире человек совершил космическое путешествие, своевременность и актуальность таких исследований очевидны.

Измерение вязкости жидкости

Вязкость является одним из основных физических свойств жидкости, определяющих скорость и характер ее течения. Для всех смазочных масел вязкость есть основная характеристика. Достаточно небольшого изменения вязкости краски, наносимой через распылитель, чтобы эта краска легла совершенно по-иному. Изменение вязкости нефти, сгораемой в форсунках парового котла, меняет весь его тепловой режим. Вязкость является показателем хода различных технологических процессов, таких, как выпаривание, сгущение, растворение, полимеризация и т. д.

Все хозяйки хорошо знают, что о степени готовности варенья в процессе его варки удобнее всего судить по характеру стекания сиропа с ложки, т. е. именно по его вязкости.

К сожалению, применяемые в технологии методы измерения вязкости и соответствующие приборы — вискозиметры — недалеко ушли от приведенного выше примера: о вязкости жидкости судят по скорости ее вытекания через маленькое отверстие. Не говоря уже о том, что такое измерение занимает много времени — до нескольких минут в случае вязких жидкостей, — основным недостатком этого метода является необходимость взятия пробы. Проба всегда чем-то отличается от основной массы жидкости: она находится при другой температуре, соприкасается с воздухом, с материалом вискозиметра и т. д. Все эти обстоятельства могут изменять свойства пробы, в том числе и ее вязкость. Кроме того, всегда есть трудности взятия проб радиоактивных и химически активных жидкостей, жидкостей, находящихся при очень высоких температурах и под большим давлением.

Ультразвук позволяет измерять вязкость на месте в тех условиях, в которых жидкость находится. Принцип устройства ультразвукового вискозиметра можно уяснить себе из следующего примера: известно, как хорошо, чисто и долго звенит пустой стакан, по которому ударили ложечкой. Если стакан заполнить водой — продолжительность звона уменьшается; если же он наполнен сметаной, то от удара получается тупой и очень короткий звук. Длительность звучания зависит в первую очередь от вязкости содержи-

мого стакана: чем вязкость больше, тем длительность меньше.

В ультразвуковом вискозиметре «ударяют» по маленькому стерженьку или пластиночке, которые колеблются с ультразвуковой (а иногда и звуковой) частотой, и затем замеряют время послезвучания. Результат можно видеть на шкале индикатора. Для измерения достаточно 1 $см^3$ жидкости, а время измерения — доли секунды. Кроме того, индикатор может быть отнесен от стерженька-датчика на несколько сот метров, что дает возможность проводить дистанционные измерения. При желании показания датчика или нескольких датчиков могут непрерывно записываться на бумажную ленту.

Ультразвуковая локация

Ультразвук был впервые применен для обнаружения айсбергов. Как известно, от столкновения с айсбергом погиб большой океанский пароход «Титаник». Эта катастрофа побудила начать интенсивную разработку средств защиты от подобных столкновений.

Метод обнаружения айсбергов был основан на использовании явления эхо, т. е. явления отражения звуковой волны от препятствий. Так как скорость распространения звука в воде хорошо известна, то, зная время, в течение которого звук в воде шел до препятствия и вернулся обратно, нетрудно определить это расстояние.

Физическая сущность эхо была известна еще в древнее время. В известной поэме Лукреция (99—55 гг. до н. э.) «О природе вещей» дается такое определение этого явления:

> Та же часть голосов, что до самых ушей не доходит,
> Попусту мимо идет и, рассеявшись в воздухе, гибнет;
> Часть же другая, в пути отскочивши от твердых предметов,
> Звук отдает и порою морочит подобием слова.

Однако первое предложение об использовании этого явления для практических целей было сделано только в 1804 г. академиком Я. Д. Захаровым. Поднявшись на воздушном шаре для проведения научных наблюдений, он обратил внимание на то, что эхо возвращается к нему

с земли через вполне определенное время, зависящее от высоты подъема шара.

Впоследствии явление эхо нашло широкое применение для определения глубины моря прибором, носящим название эхолота. До этого глубина моря определялась обычным лотом, т. е. грузом, опускаемым до его соприкосновения с морским дном. Такие измерения занимали очень много времени, особенно при больших глубинах, и не отличались достаточной точностью, так как за время опускания и подъема груза корабль сносило иногда на значительное расстояние.

Измерения же глубины при помощи эхолота требуют столько времени, сколько нужно звуку для того, чтобы пробежать расстояние от поверхности воды до дна и обратно. Так как скорость звука в морской воде составляет приблизительно 1500 *м/сек*, то время измерения даже самых больших известных глубин (8—10 *км*) равно всего лишь 11—14 *сек*.

Однако в случае применения эхолота, работающего на слышимых частотах, в силу ненаправленности этих звуков неизвестно, с какой стороны пришло эхо: сигнал ли это снизу, от дна, или от какого-либо другого препятствия, случайно оказавшегося в поле измерений (например, от берега или подводной скалы). Поэтому к показаниям такого эхолота нужно было относиться с известной осторожностью.

Переход на ультразвуки позволил применить направленные звуковые пучки и тем самым получить сведения не только о расстоянии, на котором находится препятствие, но также и о его местоположении. Ультразвуковые эхолоты работают уже гораздо надежнее, и их показаниям можно вполне доверять.

Сочетание ультразвукового эхолота с самопишущим прибором позволяет вести непрерывные и точные наблюдения за глубиной моря на пути движения корабля. Подобного рода измерения позволили подойти к составлению достаточно подробной и достоверной карты морских и океанских глубин. При наличии такой карты эхолот превращается в надежного помощника штурмана; показания его являются одним из существенных моментов, по которым штурман определяет местоположение корабля. Точность работы эхолотов достаточно высока. При помощи

записывающего эхолота удалось обнаружить лежащий на дне (на глубине около 90 *м*) большой океанский корабль «Лузитания», который был потоплен немецкой подводной лодкой во время империалистической войны 1914—1918 гг.

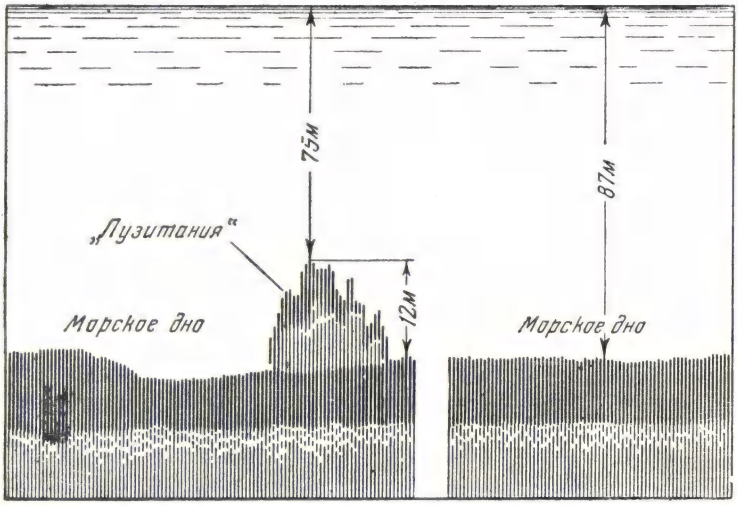


Рис. 36. Запись эхолота, на которой видны контуры затонувшей «Лузитании»

На рис. 36 приведена копия записи эхолота. Лежащий на дне корабль вырисовывается в виде силуэта с надстройками и трубами на фоне ровного профиля морского дна.

По отражению ультразвука от дна можно не только определять профиль дна, но и судить о типе данного грунта. Так, например, скалистый грунт дает сильное, четкое эхо; если грунт песчаный или илистый, то часть упавшей звуковой энергии проходит в грунт и поэтому интенсивность эха значительно снижается. Иногда, если под слоем ила или песка лежит слой плотного грунта, удается по записям эхолота обнаружить это «второе дно» и определить толщину верхнего слоя.

Существуют и более универсальные приборы, позволяющие направлять звуковой луч не только вертикально, но и под любым углом к горизонту. Подобного рода приборы,

получившие название гидроакустических локаторов или просто гидролокаторов, имеют в настоящее время очень широкое распространение. Гидролокатор, установленный на корабле, может определять глубину моря (рис. 37, *а*), что необходимо для целей навигации, предупреждать о приближении опасных айсбергов (рис. 37, *б*), обнаруживать подводные лодки (рис. 37, *в*) и т. д.

Эхо в море можно получить и от косяка рыбы, что широко используется в промысловой рыбной разведке. На рис. 38 показаны записи эхолота в районе скопления рыбы.

Имея такую карту расположения косяков, разведывательное судно «наводит» рыболовецкие корабли на эти косяки, обеспечивая тем самым надежность лова при минимальной затрате времени на поиски.

Как это было недавно установлено, способность летучих мышей хорошо ориентироваться в темноте и летать, не задевая препятствия, объясняется наличием в их организме органа, работающего по принципу ультразвукового локатора. Во время полета летучие мыши непрерывно излучают импульсы ультразвуковых частот и воспринимают ушами их отражение от находящихся в непосредственной близости посторонних предметов.

У одного из видов летучих мышей излучаемые для «навигационных» целей импульсы лежат в диапазоне 30—120 *кгц* с максимумом в области 50 *кгц*. Длительность этих импульсов колеблется в пределах 1—3 миллисекунд, что соответствует протяженности импульса 34—100 *см*. Частота следования этих импульсов равна 5—10 в секунду, если мышь находится в покое. В полете эта частота увеличивается до 20—30, а у препятствия — до 50—60, затем частота скачком снижается до прежней цифры 20—30. Этот вид мышей излучает ультразвуки гортанью с сильно развитой мускулатурой и относительно большим количеством костных тканей. Чувствительность слухового аппарата летучих мышей к ультразвукам изучалась разными методами. Американский физиолог Галамбос (открывший аппарат ультразвуковой локации у летучих мышей) изучал электрические токи, возбуждающиеся в слуховой улитке летучих мышей. Он обнаружил, что чувствительность их к ультразвукам лежит в области частот 10—90 *кгц*. Другой ученый занялся дрессировкой летучей

мыши по методу условных рефлексов и научил ее по сигналу при частоте 40 *кгц* прилетать к садовой скамейке и брать там приготовленного для нее червяка. Интересно, что

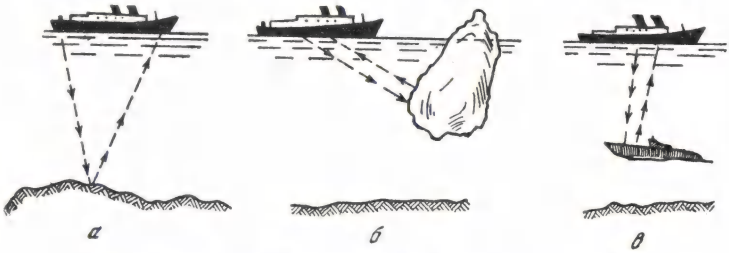


Рис. 37. Различные применения гидролокатора

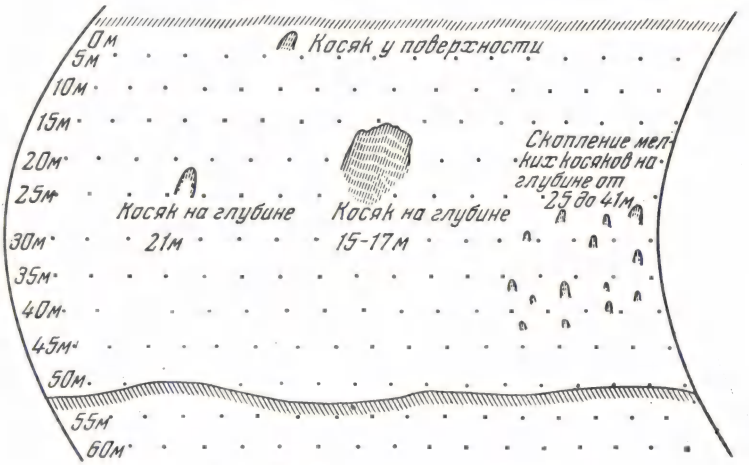


Рис. 38. Запись рыболокатора

в полной темноте летучая мышь отличала скамейку со стеклянной спинкой (отражавшую ее «навигационный» импульс) от скамейки со спинкой, обтянутой бархатом, который этот импульс поглощал.

Другой вид летучих мышей излучает ультразвуки носом при закрытой пасти. При этом получается более узкий и концентрированный пучок, обеспечивающий большую дальность. Длительность импульса у этого вида мышей

больше, частота повторения значительно меньше и соответствует периоду выдоха. Поэтому пока не ясно, каким образом этот вид летучих мышей определяет расстояние до отражающего препятствия.

Ночные бабочки слышат ультразвуковые колебания в диапазоне 10—200 *кгц*. Очень интересно, что ультразвуки вызывают у них своеобразную реакцию «замирания» или, наоборот, «бегства». Можно предположить, что таким путем бабочки спасаются от летучих мышей, которые выдают себя ультразвуковыми «навигационными» импульсами. Доказательством того, что эта реакция вызывается именно воздействием ультразвуковых колебаний, служит тот факт, что реакция совершенно пропадает после прокалывания барабанной перепонки. Если это действительно так, то делается понятной роль густого слоя волосков, покрывающих туловище ночных бабочек. Этот слой не отражает, а поглощает падающий на него звук, и таким образом бабочка ускользает от летучей мыши.

Летучая мышь — не единственное животное, применяющее звуковую локацию для ориентации в полете. Дельфины также «пользуются» ультразвуком для ориентации в окружающей обстановке и, в частности, для поиска пищи. Исследования, проведенные над дельфинами в бассейнах, показали, что они все время бодрствования один раз в 15 сек. посылают «контрольный» ультразвуковой импульс. Если вокруг ничего нет, и, следовательно, от этого контрольного импульса не приходит эхо, делается пауза в 15 сек. Если же контрольный импульс дает эхо, посылка импульсов резко учащается, и дельфин начинает активный поиск добычи.

По-видимому, ультразвуковой «эхолот» имеется и у кита. Кит, как известно, питается планктоном, поэтому ему не нужно думать о пище, которая густо населяет каждый кубометр океанской воды. Но, спасаясь от преследования, кит с огромной быстротой ныряет на очень большие глубины. Ультразвуковой локатор помогает ему определить расстояние до дна и заблаговременно остановиться, чтобы не разбиться.

В 1954 г. было установлено, что аналогичный локатор имеется у одного вида птиц, обитающих в темных пещерах Латинской Америки. Птица эта была впервые описана 155 лет назад знаменитым естествоиспытателем А. Гум-



Поль Ланжевен
(1872—1946)

больдтом, обратившим внимание на то, что во время полета в пещере она поразительно резко кричит. Туземцы назвали ее «гвачаро», что значит плачущая или жалующаяся. Записи крика этой птицы показали, что она действительно посылает короткие отрывистые импульсы, правда не ультразвуковой частоты, а высокой звуковой (около 7 *кгц*), и пользуется отражениями этих импульсов для определения препятствий, находящихся на пути ее полета.

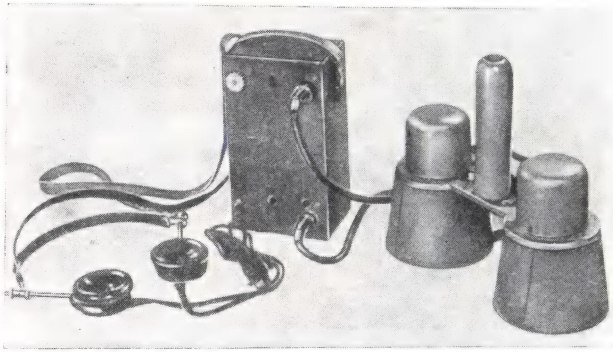


Рис. 39. Прибор для ориентации слепых

В последнее время делаются попытки создать на этом принципе миниатюрный локатор, позволяющий слепому ориентироваться относительно окружающих его препятствий. Один из опытных образцов такого прибора показан на рис. 39. Этот прибор состоит из ультразвукового излучателя и смонтированного с ним рядом ультразвукового приемника, переносимого в руке. Ящик с батареей на поясе или в кармане. Эхо-сигналы, отраженные от препятствий, воспроизводятся при помощи телефона: таким образом слепой может обнаруживать препятствия, находящиеся на расстоянии до 10 *м*.

Измерение расстояний и определение смещений

Импульсная ультразвуковая техника находит широкое применение не только при решении локационных задач, для которых требуется в первую очередь установить на-

личие или отсутствие искомого предмета, а затем выяснить и его местоположение. Жизнь выдвигает множество задач, решение которых сводится только к определению расстояния до границы твердого и жидкого вещества и к определению формы этой границы и ее движения. В какой-то степени эта группа вопросов развилась из уже рассмотренных нами выше. Основная задача эхолота заключается в определении расстояния до дна водоема и в

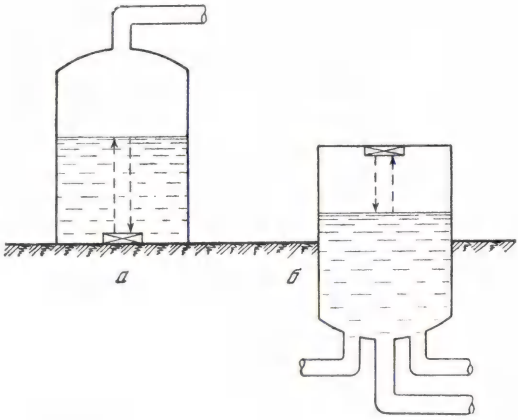


Рис. 40. Схемы ультразвуковых уровнемеров

изучении его профиля; что же касается наличия или отсутствия самого дна, то этот вопрос не вызывает сомнений, и следовательно, не требует своего разрешения.

Примером задач этого типа является определение уровня жидкости в закрытом сосуде, например бензохранилище. Из предыдущего ясно, что эта задача легко может быть решена при помощи эхолота, помещенного на дне сосуда (рис. 40, *а*). В некоторых случаях оказывается более удобной установка эхолота не на дне, а наоборот, на крышке хранилища. В частности, такое размещение лучше, если жидкость очень вязка и с трудом «пробивается» ультразвуком (рис. 40, *б*). При верхнем размещении можно также определять высоту засыпки твердых комков, например в доменной печи, или сыпучих тел.

На принципе эхолота работает также шахтный профилограф. Эхолот, создающий горизонтально направленные ультразвуковые импульсы, медленно перемещается вдоль оси вертикальной шахты. Ясно, что на бумажной ленте самописца при этом будет вырисовываться профиль обследуемой шахты. Поворачивая эхолот в горизонтальной плоскости, можно получить горизонтальное сечение шахты на любом уровне. Прибор работает на частоте 21 *кгц* и снабжен магнитострикционным вибратором.

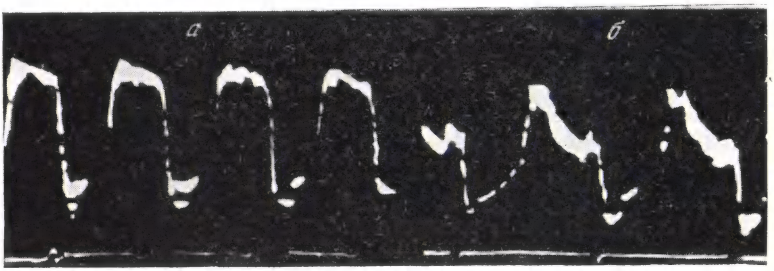


Рис. 41. Ультразвуковая кардиограмма:

а — больное сердце (митральный стеноз до операции);
б — здоровое (после операции)

Если импульсы неподвижного эхолота направить на колеблющееся тело, то на ленте самописца мы получим запись этих колебаний, по которой можно определить амплитуду, частоту и даже форму колебаний отражающей поверхности тела. Таким путем легко обнаружить, например, движение поверхности живого сердца. Применяя высокие частоты и, соответственно, тонкие ультразвуковые лучи, удается даже проследить за колебаниями отдельных его участков и заметить отклонения этих колебаний от нормы, т. е., другими словами, констатировать и диагностировать сердечные заболевания. Запись колебаний сердца получила название ультразвуковой кардиограммы; примеры таких кардиограмм показаны на рис. 41. Ультразвуковые кардиограммы пополняют сведения, получаемые из обычных кардиограмм (записей электрических токов сердца) и таким образом существенно способствуют установлению правильного диагноза того или иного заболевания.

Можно также исследовать вибрацию частей работающих механизмов и машин без механического контакта между измерительным прибором-вибратором и деталью, что особенно существенно при исследовании вибрации быстровращающихся или движущихся частей, например турбинных дисков.

Для измерения быстрых вибраций с частотой в сотни и тысячи герц используют приборы, основанные на так называемом эффекте Допплера.

Эффект Допплера заключается в том, что если нормально действующий источник звука приближается к наблюдателю, то частота воспринимаемого звука повышается, а если источник удаляется — частота понижается. Особенно рельефно эффект Допплера ощущается, когда мы слушаем гудок проносящегося мимо нас паровоза или шум реактивного самолета. Здесь существенно отметить, что речь идет не о субъективном ощущении, связанном, например, со свойствами нашего органа слуха, а об объективно существующем эффекте, который легко обнаруживается измерительными приборами.

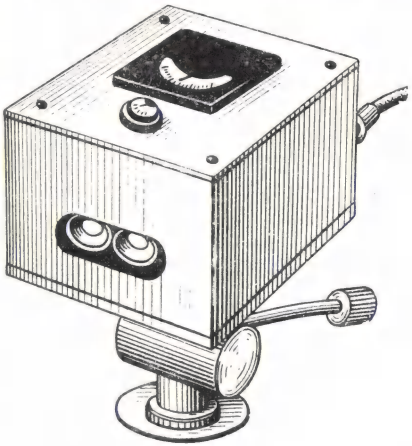


Рис. 42. Внешний вид бесконтактного виброметра

На рис. 42 показан работающий на этом принципе бесконтактный виброметр. Он состоит из излучателя и приемника, работающих на частоте 115 *кгц*. Кварцевый излучатель непрерывно излучает ультразвуковой луч, который, отражаясь от исследуемой поверхности, воспринимается кварцевым приемником. Частота принятого сигнала сравнивается с частотой излучаемого. Если отражающая поверхность стоит на месте, то эти частоты равны. Если же отражающая поверхность колеблется, то в те моменты, когда она перемещается по направлению к

прибору, частота принятого звука слегка повышается, а когда от прибора — понижается.

Описанный прибор позволяет измерять колебания с частотами от 3 до 200 *гц* при амплитудах до 2,5 *мм*. При этом сам прибор может располагаться на расстоянии до 1,5 *м* от детали.

Выявление внутренних дефектов

Принцип ультразвуковой локации с успехом используется для отыскания внутренних пороков (трещин, раковин и т. д.) в различных изделиях.

Прочность металлических изделий и деталей имеет очень существенное значение. Она может быть резко понижена из-за наличия мелкой, иногда неразличимой глазом трещинки, получившейся, например, при прокатке металла, либо раковины, образовавшейся во время отливки.

Дефектоскопия — техника обнаружения внутренних дефектов — пользуется различными методами, но большинству из них присущи недостатки. Одно из наиболее универсальных средств — ультразвук, использование которого для этой цели впервые предложил советский физик С. Я. Соколов еще в 1928 г.

Среди различных методов ультразвуковой дефектоскопии наиболее распространенным является уже известный нам метод обнаружения неоднородностей с использованием эхо-сигнала.

Схема работы ультразвукового дефектоскопа показана на рис. 43. К исследуемому телу, в данном случае к цилиндрическому стержню, плотно прижимаются две головки, одна из которых посылает ультразвуковой сигнал, а другая принимает его отражение (рис. 43, *а*). В случае отсутствия дефекта звуковой сигнал дойдет до противоположного края изделия и, вернувшись обратно, возбудит электрический сигнал в приемной головке. Если же на пути сигнала встретится какая-нибудь неоднородность, например раковина или трещина, приемная головка воспримет сначала эхо, отраженное от этой неоднородности, а затем уже эхо от противоположной границы. Промежуточный эхо-сигнал будет свидетельствовать о наличии дефекта. На рис. 43, *б* показаны кривые, наблюдаемые на экране электронно-лучевой трубки — индикаторе дефектоскопа.

В верхней части рисунка показана кривая, получающаяся при отсутствии дефекта. Пик слева соответствует моменту посылки сигнала, пик справа — моменту прихода эха. Расстояние между этими двумя пиками в определенном масштабе представляет собой размер исследуемого изделия в направлении ультразвукового луча.

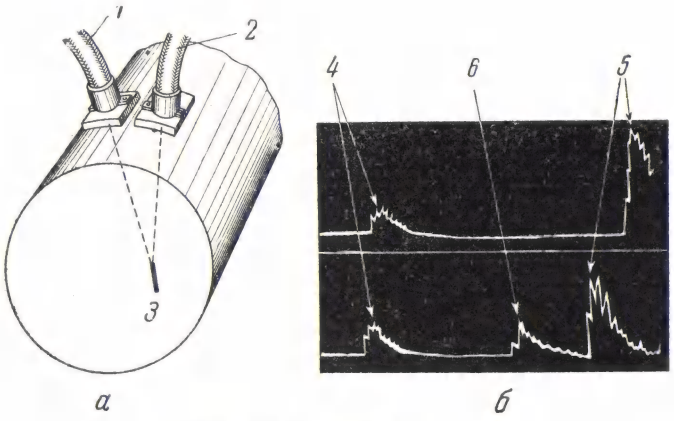


Рис. 43. Схема эхо-дефектоскопа:

а — схема прибора; б — кривые на экране индикатора. 1 — излучатель ультразвука; 2 — приемник ультразвука; 3 — дефект; 4 — излученный импульс; 5 — импульс, отраженный от края предмета; 6 — импульс, отраженный от дефекта

Зная масштаб, определяемый скоростью распространения звука в материале, можно таким путем определять толщину изделия. Удобство такого импульсного толщиномера заключается в том, что при работе с ним достаточен подход лишь с одной стороны изделия. Если изделие состоит из нескольких слоев, можно определять их толщину.

Кривая в нижней части рисунка соответствует такому случаю, когда ультразвуковой луч встречает на своем пути дефект. Между двумя пиками, соответствующими переднему и заднему краю изделия, появляется третий пик — результат отражения звукового луча от внутреннего дефекта.

Чувствительность импульсного дефектоскопа и его «пробивная» способность чрезвычайно велики. Он может

обнаружить раковинки размером в несколько миллиметров в толще металла на глубине нескольких метров. Прибор имеет сравнительно небольшие размеры, портативен и питается от сети переменного тока. Частота, на которой обычно работают такие дефектоскопы, лежит в пределах 0,5—5,0 *Мгц*.

Кроме импульсных дефектоскопов, применяются и так называемые теневые дефектоскопы, т. е. такие, в которых наличие или отсутствие дефекта определяется не по отражению, а по прохождению ультразвукового луча через обследуемую деталь. Теневые дефектоскопы обычно работают не в импульсном режиме, а в режиме непрерывного действия, что значительно упрощает их схему и устройство. Особенно широко они применяются для контроля расслоения в тонких листовых материалах, для контроля проволоки, для проверки качества склеивания или нанесения различных покрытий на листовые материалы. На рис. 44 показаны различные примеры применения теневого дефектоскопа.

Теневые дефектоскопы непрерывного действия нашли также широкое применение для контроля автомобильных шин, что позволяет надежно установить наличие расслоений между протектором и кордом и т. д. На рис. 45 приведены схема устройства (рис. 45, *а*) и внешний вид такого дефектоскопа (рис. 45, *б*).

Обследуемая шина погружается в ванну с жидкостью, например с водой. Через границу раздела воды и резины звук проходит почти без отражений, и посланный излучателем сигнал практически полностью воспринимается приемником. Если во время вращения шины на пути звукового луча между излучателем и приемником окажется расслоение, т. е. полость, заполненная воздухом, то в силу большого отражения на границе резина — воздух эта полость окажется непрозрачной. Поэтому звуковой луч и сигнал, улавливаемые приемником, заметно ослабятся. По степени ослабления можно судить как о наличии дефекта, так и его величине.

Аналогичный дефектоскоп может быть применен для контроля раковин и трещин в бетоне или железобетоне. Один из таких дефектоскопов разработан в Научно-исследовательском институте железобетона. Так как этот прибор предназначен для обнаружения дефекта порядка 8 –

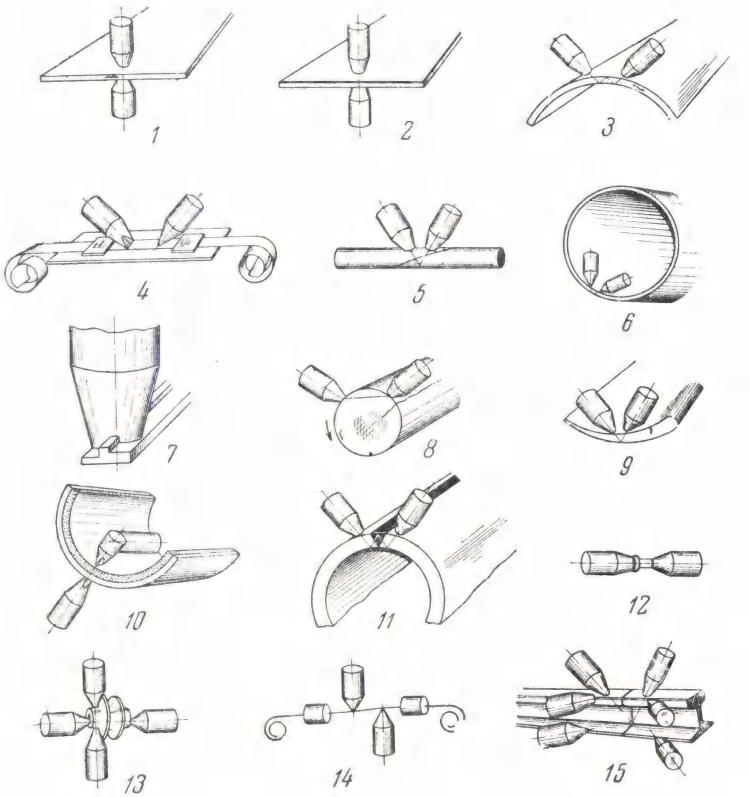


Рис. 44. Примеры применения теневого дефектоскопа для выявления:

1 — расслоения листов; 2 — нарушения качества прилегания покрытий; 3 — расслоений и трещин в резервуарах, котлах и трубах; 4 — ликваций и текстур в полосовых и листовых материалах; 5 — качества спая проводов; 6 — дефектов прилегания хромового покрытия цилиндров; 7 — точности профилирования; 8 — трещин и разрывов в стержнях; 9 — трещин в турбинных лопатках; 10 — однородности заливки вкладышей подшипника; 11 — качества сварных швов; 12 — качества прилегания направленных контактов; 13 — трещин и разрывов изоляторов; 14 — трещин проволоки; 15 — качества сварки рельсов

10 *см*^{2} и, следовательно, работает с широким лучом, в нем применена сравнительно низкая частота — 50 *кгц*. При такой частоте затухание ультразвука в бетоне невелико, и поэтому дефектоскоп может применяться для контроля блоков больших размеров. Серьезной задачей является

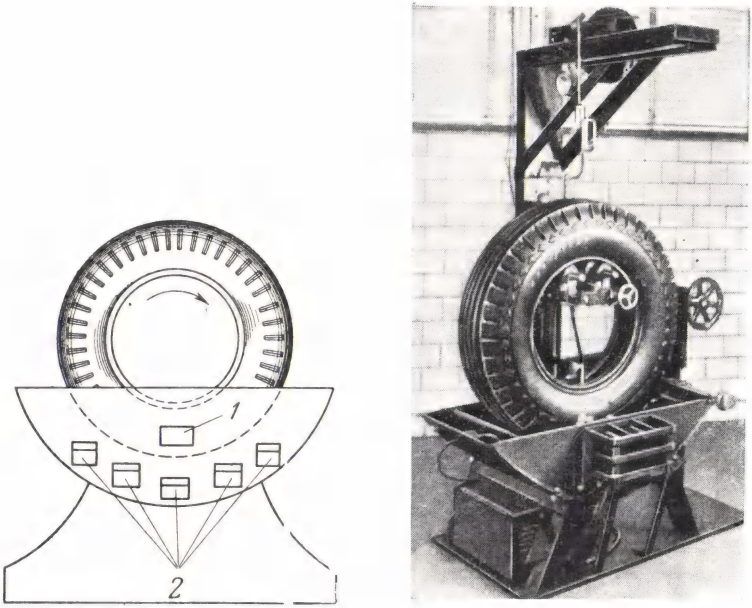


Рис. 45. Дефектоскоп для контроля автошин:
а — схема; б — общий вид.
1 — излучатель; 2 — приемники

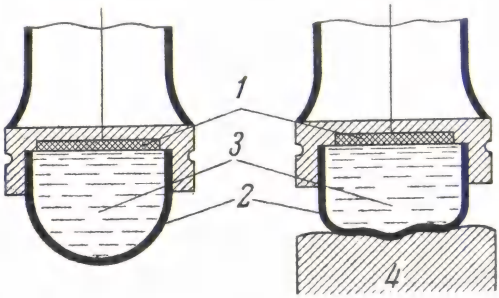


Рис. 46. Резиновые наконечники к щупам для дефектоскопии изделий с неровной поверхностью:
а — в свободном состоянии; б — в прижатом состоянии.
1 — кристалл; 2 — резиновая оболочка; 3 — контактная жидкость;
4 — обследуемое изделие

осуществление хорошего контакта излучателя и приемника с шероховатой поверхностью бетона. Если просто прижать излучатель, то соприкосновение произойдет лишь в нескольких точках, и количество переданной в бетон звуковой энергии будет очень мало. Для решения этой задачи излучатель и приемник помещают в мягкие резиновые «мешки», заполненные жидкостью (рис. 46). Как уже отмечалось выше, переход звуковых лучей из жидкости в резину происходит почти без всякого отражения, резиновая же мембрана плотно прилегает к поверхности бетона, покрывая все его неровности.

При помощи описанных приборов можно не только устанавливать наличие дефекта и его местоположение, но и определять приблизительно его контур, прощупывая точку за точкой. Если мы хотим найти форму этого контура с достаточной точностью, то прощупывание должно производиться узким пучком. Однако чем у́же пучок, чем меньшую площадку он перекрывает, тем больше времени требует определение контура дефекта. Для того чтобы этот метод можно было применять на практике, процесс получения сигнала о препятствии (по ходу луча) на экране должен быть автоматизирован. На рис. 47 дана схема исследования одного из таких методов, который называется методом импульсных разрезов. Этот метод применим в тех случаях, когда обследуемый объект может быть «пробит» звуковым пучком насквозь, что возможно, если волновые сопротивления отдельных элементов структуры не слишком сильно различаются.

Излучатель *И* (рис. 47, *а*) посылает острый луч *Л* в направлении исследуемого объекта, находящегося в правой части рисунка. Пусть этим объектом является круглый стержень, окруженный толстой оболочкой. T_1 — внешняя граница оболочки, T_2 — линия соприкосновения наружной поверхности стержня с внутренней поверхностью оболочки. Пошлем теперь, как это делается в обычном импульсном дефектоскопе, короткий ультразвуковой импульс и переведем затем излучатель в режим приема. Тогда наша схема примет приходящие последовательно одно за другим четыре эхо, соответствующих отражениям посланного импульса от четырех границ раздела. При обычном методе приема эти четыре эхо создадут на приемном экране четыре торчащих в виде гребешка пика, как это показано на

рис. 47, *б*. До этого момента описываемый метод, в сущности, ничем не отличается от обычного импульсного дефектоскопа. Можно, однако, слегка видоизменив схему

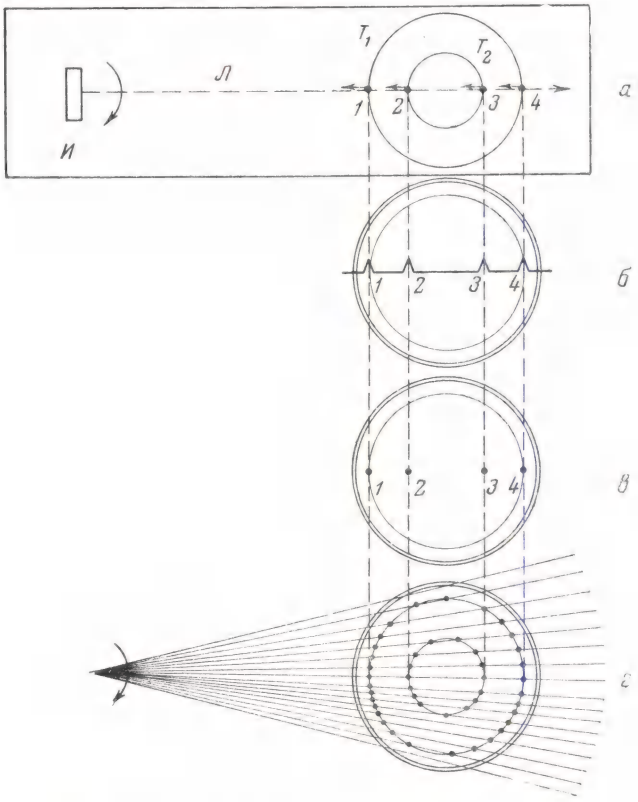


Рис. 47. Принцип метода импульсных разрезов:

а — расположение аппаратуры в ванне; б — вид отраженных импульсов на экране электронного осциллоскопа при обычном методе индикации; в — отраженные импульсы, видимые на экране в виде точек, положение которых соответствует положению точек пересечения луча с поверхностями обеих трубок; г — при вращении ультразвукового излучателя из точек складывают контуры обеих трубок

приема, получить на приемном экране вместо пиков яркие точки, положение которых будет соответствовать основаниям пиков (рис. 47, *в*).

Теперь приведем наш излучатель во вращательное движение вокруг оси, перпендикулярной к плоскости рисунка, как это показано на рис. 47, *г*. Одновременно заставим «поворачиваться» след электронного луча приемной трубки так, чтобы его направление в каждый данный момент соответствовало направлению звукового луча, пересекающего обследуемый объект. Тогда на экране будут поочередно вспыхивать четверки светящихся точек, соответствующих по своему местоположению точкам пересечения луча с границами. Нетрудно убедиться в том, что если все эти светящиеся точки соединить линиями, то эти линии воспроизведут границы объекта. Практически проводить эти линии нет надобности, так как смена светящихся точек происходит настолько быстро, что вследствие инерции глаза мы воспринимаем эти границы в виде светящихся линий и видим на экране электронной трубки разрез рассматриваемого объекта в плоскости вращения луча излучателя.

Работающие по этому принципу дефектоскопы хотя и более громоздки, но зато имеют автоматизированный поиск и, что самое главное, позволяют видеть размер дефекта и формы его передней границы.

Применение ультразвука в медицинской диагностике

Метод импульсных разрезов очень удобен вследствие своей наглядности и начинает применяться не только в дефектоскопии, но и для медицинской диагностики, дополняя широко распространенные методы рентгенографии. На рис. 48 показано сечение шеи человека на уровне пятого шейного позвонка, полученное методом импульсных разрезов. Так как внутренние полости шеи заполнены воздухом, и, следовательно, благодаря большому отражению ультразвуковой луч не может пробить интересующие нас структуры насквозь, полученный снимок «сшит» из четырех четвертей, каждая из которых снималась в отдельности по направлению от периферии к центру шеи. При внимательном рассмотрении можно даже обнаружить стыки, особенно внизу и слева. Таким же путем можно получать поперечное сечение ноги, руки и др.

Описанная методика может быть с успехом применена в животноводстве для определения степени упитанности животных. На рис. 49 показаны первые результаты — полученный при помощи ультразвукового прибора «разрез» части туши быка. Хорошо виден слой подкожного жира, равно как и жировые вкрапления в мышечной ткани. По приведенной фотографии можно сразу получить представление о сортности мяса.

При некотором усовершенствовании аппаратуры подобные картины можно получать непосредственным обследованием живого скота, что, по-видимому, может решить трудный, но очень важный вопрос объективного определения степени упитанности живого скота.

Были сделаны также попытки обнаружения злокачественных опухолей, находящихся в мягких тканях. В качестве примера сошлемся на рис. 50, на котором справа показано изображение на экране нормальной женской груди, а слева — пораженной раковой опухолью; различие между снимками очень разительно. Полученные предварительные результаты позволяют надеяться, что можно будет устанавливать наличие злокачественных опухолей на ранних стадиях их развития, т. е. тогда, когда оперативное вмешательство дает наилучшие результаты.

Может возникнуть вопрос: может ли этот метод заменить рентгеноскопию? Оказалось, что метод импульсных разрезов имеет не только существенные преимущества, но и не менее существенные недостатки и, таким образом, речь должна идти не о вытеснении одного метода другим, а об их взаимном дополнении. Основным недостатком метода импульсных разрезов является то обстоятельство, что звуковой луч не может пересекать полости, заполненные воздухом. Всякая такая полость является для него непреодолимой преградой, закрывающей (в виде темного пятна) все то, что лежит за ней, тогда как для рентгеновского луча таким непреодолимым препятствием является только тяжелый металл, например свинец. Преимуществом ультразвукового метода является гораздо бóльшая чувствительность к различению плотностей двух соседних структур. Эта бóльшая чувствительность объясняется возможностью применения импульсного метода при работе на ультразвуке, а не физическим различием между ультразвуком и рентгеновскими лучами. Дело в том, что,

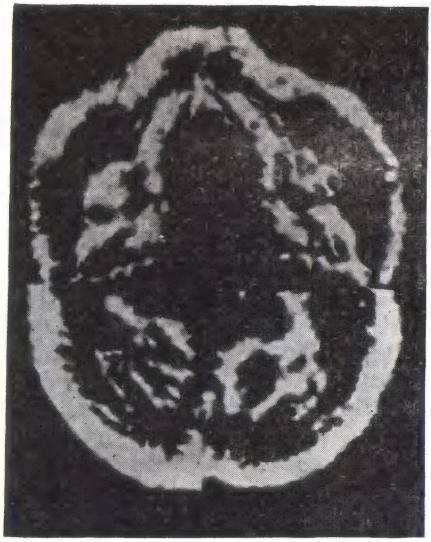


Рис. 48. Импульсный разрез шеи живого человека на уровне 5-го шейного позвонка



Рис. 49. «Разрез» куска жирного мяса, выполненный ультразвуковым импульсным методом

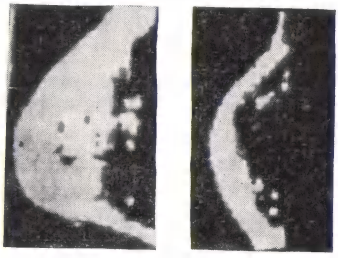


Рис. 50. Ткань человеческого тела, «просмотренная» методом импульсных разрезов

применяя импульсный метод, мы ведем прием слабого сигнала после того, как сильный сигнал уже закончился; это обстоятельство позволяет обнаруживать отраженные сигналы, составляющие тысячные и десятитысячные доли от посланных. При непрерывном же облучении, конечно, невозможно обнаружить изменение посылаемого сигнала на одну десятитысячную его величины.

Тогда, естественно, возникает следующий вопрос: почему же нельзя применить импульсный метод в рентгеноскопии? Здесь уже на первое место выступает различие физических процессов. Звуковые волны в тканях распространяются со скоростью около 1500 *м/сек*. Для получения хорошей разрешающей способности необходимо работать с коротким импульсом, например 1,5 *мм* длиной. Такой импульс, как это видно из простого подсчета, имеет продолжительность около одной миллионной доли секунды. Скорость же распространения рентгеновских лучей составляет, как известно, 300 тыс. *км/сек*, т. е. превышает скорость звуковых волн в 200 тыс. раз. Таким образом, импульс рентгеновских лучей в 1,5 *мм* для получения той же разрешающей способности должен иметь продолжительность в 200 тыс. раз меньшую одной микросекунды! Такие короткие импульсы мы пока не умеем получать, и поэтому при современном уровне техники рентгеноскопия применяется только в режиме непрерывного излучения, что, как мы уже видели, не позволяет обнаруживать слабые отражения.

Некоторое усложнение метода импульсных разрезов, заключающееся в том, что излучатель одновременно с вращательными движениями в плоскости чертежа перемещается вдоль оси вращения вверх и вниз, позволяет получить последовательно один за другим ряд сечений обследуемого тела. Если эти сечения отразить на экране приемной трубки, несколько сдвинув их одно по отношению к другому наискось, можно получить перспективное изображение внутренней структуры оптически непрозрачной среды. Результаты первых удачных опытов в этом направлении можно видеть на рис. 51, где показаны перспективные изображения куба из проволочной сетки, находящегося в воде, при различных ориентациях его осей по отношению к направлению падения звукового луча.

Недавно удалось сконструировать миниатюрный вращающийся излучатель, который может быть введен в полость живого организма, например в желудок. Этот излучатель заключен в оболочку из тоненькой резиновой

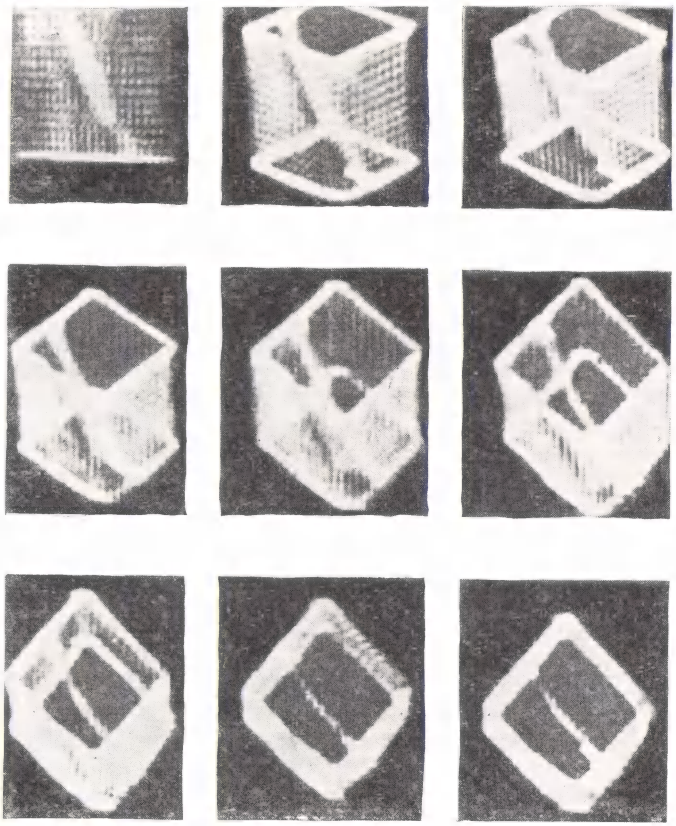


Рис. 51. Перспективные изображения куба из проволочной сетки, полученные усовершенствованным методом импульсных разрезов

пленки. После введения излучателя в желудок, в оболочку накачивается вода, которая растягивает ее до тех пор, пока последняя не примкнет плотно к стенкам желудка. После этого можно провести детальное обследование стенок желудка и всех непосредственно примыкающих к ним тканей.

ГЛАВА

IV

Ультразвуковые фотографии

Используя метод импульсных разрезов, можно получить представление о внутренней структуре изучаемой среды; можно видеть сечение этой среды плоскостью, в которой лежат посылаемые ультразвуковые импульсы. Существует, однако, и другой метод изучения структуры: метод звуковых изображений. Этот метод аналогичен методу получения широко применяемых световых изображений, поэтому для детального его уяснения вспомним сначала, как получается световое изображение, например на матовом стекле фотографического аппарата или на чувствительной сетчатке нашего глаза.

Световое и звуковое изображение

Пусть в пространстве находится предмет, изображение которого мы хотим получить (рис. 52, *а*). В большинстве случаев предмет *2* не является источником света, поэтому прежде всего нужно позаботиться о том, чтобы его осветить. Для этой цели служит источник света *1* (солнце, луна, электрический фонарь и т. д.). Если на пути распространения какого-либо из световых лучей не будет никаких препятствий, то луч не вернется; если же на его пути будет находиться какое-либо отражающее препятствие, например интересующий нас предмет, то луч отразится от него. В том случае, когда поверхность пре-

пятствия гладкая, луч отразится, как от зеркала, в строго определенном направлении, в соответствии с законами геометрической оптики (угол падения равен углу отражения). Гораздо чаще, однако, поверхности предметов шероховаты, и поэтому луч света, вместо того чтобы зеркально отразиться, рассеивается во все стороны.

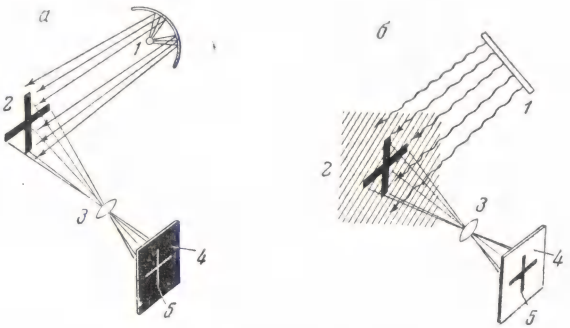


Рис. 52. Схема получения изображения:
а — при помощи световых лучей; б — при помощи звуковых

При этом часть световых лучей попадает в объектив *3* фотокамеры. Пройдя через объектив, эти лучи дают в его фокальной плоскости изображение предмета *5*, представляющее собой как бы сгусток световой энергии. Контуры этого изображения соответствуют контурам предмета. Для того чтобы наблюдать это световое изображение визуально, нужно поместить в фокальной плоскости объектива матовое стекло *4*. Благодаря очень мелкой и очень равномерной шероховатости поверхности матовое стекло хорошо рассеивает во все стороны лучи от каждой точки изображения. Часть этих лучей попадает в наш глаз, в котором роль объектива выполняет хрусталик.

Если же нужно зафиксировать полученное изображение, на месте матового стекла помещается фотопластинка или пленка, светочувствительный слой которой чернеет в тех местах, которые подвергаются действию света. Пластинка проходит необходимую обработку, в результате которой получается устойчивое, постоянное и не боящееся последующего освещения изображение.

Перейдем теперь к непосредственно интересующей нас задаче. Ультразвуковые колебания высокой частоты могут распространяться в виде узких направленных пучков, аналогичных световым лучам. Эти звуковые лучи подчиняются законам геометрической оптики. Такое сходство свойств звуковых и световых лучей явилось основанием для разработки методики получения звуковых изображений предметов, находящихся в средах, непрозрачных для световых лучей.

Схема получения звуковых изображений, по существу, не отличается от схемы получения световых изображений. Разница заключается в том, что вместо источника света мы должны применить источник звука, а вместо оптического объектива должна быть поставлена звуковая линза, как это показано на рис. 52, *б*. Тогда в фокальной плоскости звуковой линзы мы получим так называемое звуковое изображение, представляющее собой сгусток звуковой энергии. Контуры звукового изображения аналогичны контурам предмета.

Звуковые линзы

Звуковая линза по форме напоминает оптическую линзу. Материал для ее изготовления выбирают так, чтобы скорость распространения звука в этом материале была меньшей, чем в окружающей среде, так же как скорость света в стекле оптической линзы меньше скорости света в окружающем воздухе. Звуковая линза должна, кроме того, еще удовлетворять и другому требованию: звуковые лучи должны проходить через нее с минимальными отражениями на границе. Этим условиям при работе в воде удовлетворяет четыреххлористый углерод, скорость звука в котором составляет 940 *м/сек*, что соответствует показателю преломления (для звуковых лучей по отношению к воде) 1,5. Линза из четыреххлористого углерода, конечно, должна быть заключена для сохранения сферической формы в тонкую оболочку.

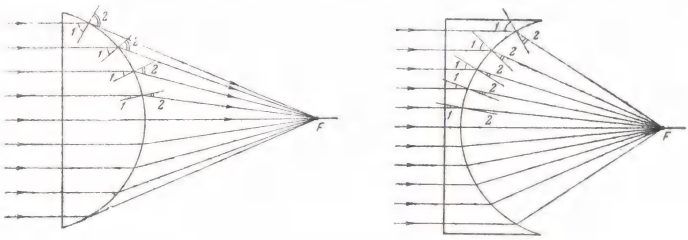
На рис. 53, *а* схематически показана фокусировка лучей такой линзой (для простоты входная поверхность линзы взята плоской и преломление рассматривается лишь на выходной поверхности). Скорость звука в материале линзы меньше, чем в окружающей среде. Углы пре-



Джон Рэлей
(1842—1919)

ломления *2* всегда больше углов падения *1*. На выходной границе линзы звуковые лучи, преломляясь, отклоняются от перпендикуляров, проходящих через точки преломления, а в результате собираются в фокусе *F*.

Так работает звуковая линза, выполненная из материала, скорость распространения звука в котором меньше, чем



а *б*

Рис. 53. Ход лучей в собирающих линзах:

а — плоско-выпуклая линза; б — плоско-вогнутая линза

в окружающей среде. Так как звуковые волны в твердых телах распространяются быстрее, чем в жидкостях, для фокусирования ультразвуковых лучей в воде можно воспользоваться материалом, в котором скорость распространения звука больше, чем в воде, например плексигласом или полистиролом, скорость звука в которых соответственно равна 2700 и 2300 *м/сек*. Несколько неожиданным является то, что собирающие линзы, выполненные из таких материалов, должны быть не выпуклыми, а вогнутыми. На рис. 53, *б* изображен ход лучей в плексигласовой линзе, работающей в воде. Скорость звука в материале линзы больше, чем в окружающей среде. После преломления луч приближается к перпендикуляру, восстановленному в точке преломления. Углы преломления *2* всегда меньше углов падения *1*. Наоборот, если бы мы захотели сделать рассеивающую линзу из плексигласа, мы должны были бы придать ей выпуклую форму.

На рис. 54, *а*, *б* изображены собирающие линзы из плексигласа. Такие твердые линзы, конечно, гораздо удобнее в обращении, чем жидкостные, так как для них не нужна дополнительная оболочка. Однако линзы, сделанные из пластмасс, имеют один существенный недоста-

ток, который сказывается, правда, только при высоких частотах. Начиная приблизительно с частот 2—3 *Мгц* и выше, поглощение ультразвуковых волн в пластмассах возрастает настолько, что потери в линзах делаются весьма ощутимыми. Более того, так как собирающая пластмассовая линза имеет вогнутую форму, т. е. края ее

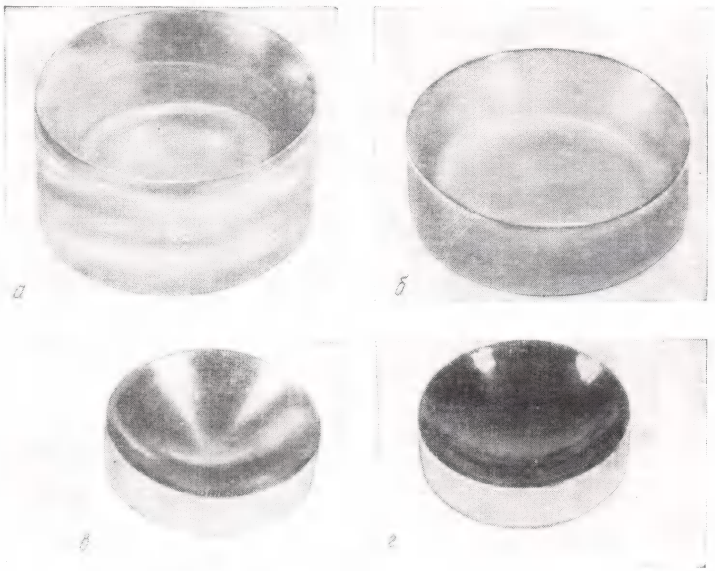


Рис. 54. Звуковые собирающие твердые линзы

значительно толще, чем середина, то звуковые лучи проходящие через края, ослабляются настолько, что практически не принимают участия в построении изображения.

Ослабление лучей на краях линзы искажает изображение и делает его мало похожим на оригинал. Но и жидкостные линзы на высоких частотах тоже мало пригодны, так как начинает сказываться поглощение звука в материале, из которого сделана их оболочка.

Хорошо было бы в этом случае применить металлическую линзу (рис. 54, *в*), так как в металлах звук поглоща-

ется значительно слабее, чем в пластмассах. Но беда в том, что такая линза практически отразит бóльшую часть звуковой энергии. Выходом из положения может явиться «просветление» звуковых линз, называемое так по аналогии с просветлением оптических линз, которое осуществляется путем нанесения на поверхность объектива очень тонких переходных слоев. Просветленный фотообъектив всегда отсвечивает синеватым светом, это — результат нанесения на него просветляющей пленки. Оказывается, что по такому же самому принципу можно «просветлять» и звуковые линзы. Для этого достаточно покрыть, как это показано на рис. 54, *г*, поверхность алюминиевой линзы тонким слоем плексигласа или бакелита. При правильно рассчитанной толщине покрытия такая «просветленная» линза пропускает до 90% энергии падающих на нее звуковых лучей, даже на самых высоких частотах (10—15 *Мгц*).

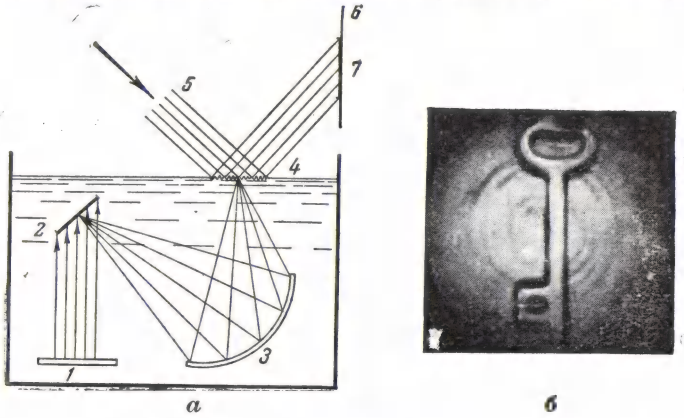
Конечно, для получения звукового изображения не обязательно применять звуковые линзы, для этой цели можно использовать и другие виды звуковых фокусирующих систем, как, например, зеркала, действие которых не зависит от частоты. Но зеркала имеют другие дефекты, связанные с тем, что приборы, необходимые для воспроизведения звукового изображения, затеняют существенную часть лучей, падающих на зеркало, что тоже в конечном счете приводит к искажению изображения.

Получение звуковых изображений

Итак, мы получили в фокальной поверхности звуковой линзы изображение, представляющее собой сгусток звуковой энергии, форма которого повторяет форму рассматриваемого объекта.

Теперь нужно сделать это изображение видимым для нашего глаза, т. е. нужно преобразовать звуковое изображение в видимое. Это преобразование носит название в и з у а л и з а ц и и звукового изображения. Только в том случае, если мы увидим на экране контур интересующего нас предмета, мы сможем сказать, что ультразвуковая информация действительно полноценно заменила нам световую.

Предложено много различных методов визуализации. Часть из них дает возможность получать постоянные, фиксированные изображения, подобно тому, как это происходит на фотографической пластинке; другие методы, наоборот, скорее напоминают метод, в котором используется матовое стекло. В этих последних случаях видимое



а *б*

Рис. 55. метод поверхностного рельефа:

а — схема установки; б — звуковое изображение.

1 — излучатель; 2 — объект; 3 — вогнутое зеркало; 4 — звуковое изображение на поверхности жидкости; 5 — пучок света; 6 — экран; 7 — видимое изображение

изображение существует только до тех пор, пока есть возбуждающее его звуковое; как только пропадает звуковое изображение, пропадает и видимое. Каждая такая «пластинка» может быть использована много раз.

Мы не будем останавливаться на описании всех предложенных методов визуализации (их известно сейчас свыше 20), а рассмотрим только некоторые, наиболее характерные и интересные.

Одной из простейших «пластинок» служит свободная поверхность жидкости. Если звуковую линзу поместить так, чтобы ее фокус оказался на поверхности жидкости, то звуковое изображение совместится с этой поверхностью.

Звуковая энергия вызовет деформацию поверхности жидкости, своеобразную рябь, которая может быть обнаружена при сильном косом освещении. Схема такой установки приведена на рис. 55, *а*, полученные

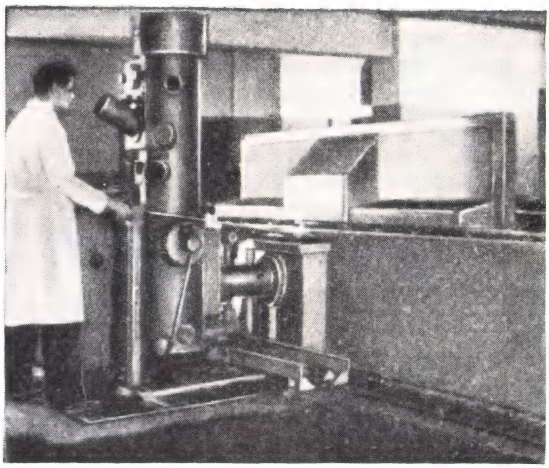


Рис. 56. Дефектоскоп, основанный на методе поверхностного рельефа

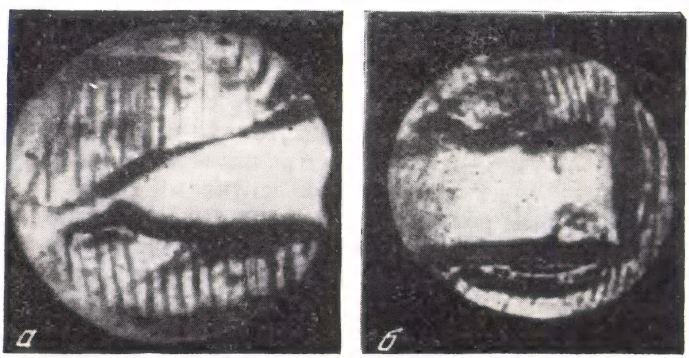


Рис. 57. Образцы обнаруженных расслоений в листовых материалах; неповрежденный металл выглядит как бы заштрихованным:

а — 6 мм сталь; б — 6 мм латунь

результаты — на рис. 55, *б*, на котором показано звуковое изображение ключа.

Недавно в ГДР был сконструирован дефектоскоп, работающий на этом принципе и предназначенный для контроля расслоений в листовых материалах. На рис. 56 показан его внешний вид, а на рис. 57 — примеры того, как выглядят дефекты на экране прибора.

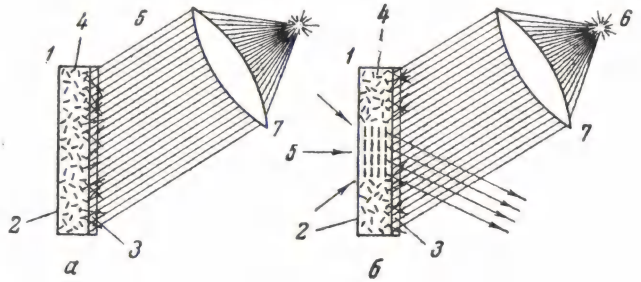


Рис. 58. Схема метода взвеси:

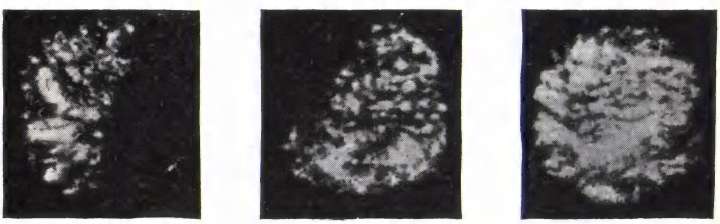
1 — кассета; 2 — тонкая пленка; 3 — зеркальное стекло; 4 — взвесь чешуек; 5 — ультразвуковые лучи, создающие звуковое изображение; 6 — источник света; 7 — конденсор

Другая группа методов основана на том, что звуковое давление вызывает наибольшее увеличение плотности среды, что в свою очередь приводит к незначительному изменению показателя преломления этой среды для световых лучей. Такие небольшие нарушения могут быть обнаружены методами, распространенными в оптике, например теневым методом.

Разберем метод, основанный на известном нам уже эффекте поворота диска в поле ультразвука (метод взвеси).

Плоская кассета *1* (рис. 58, *а*), одна стенка *3* которой сделана из зеркального стекла, а другая *2* — из тонкой, прозрачной для звука, пленки, заполняется взвесью *4* мельчайших чешуек алюминия в ксилоле. В качестве таких чешуек обычно используется отмученный порошок алюминиевой бронзы. Под действием тепловых потоков в жидкости все чешуйки непрерывно движутся в различных направлениях и поворачиваются. Поэтому, если осветить внутренность кассеты через зеркальное стекло,

то наблюдатель увидит матовую, диффузно рассеивающую поверхность: каждая частичка будет отбрасывать свет по-своему. Если теперь через тонкую стенку *2* кассеты ввести внутрь последней звуковое изображение (рис. 58, *б*), то попавшие в поле звукового луча *5* частички поворачиваются параллельно поверхности кассеты, перпендикулярно к направлению распространения ультразвука, в



а *б* *в*

Рис. 59. Изображения, полученные методом взвеси

результате чего и дадут зеркальное отражение света. При этом наблюдатель увидит светлое изображение на сером фоне.

Рассмотренный метод отличается простотой. Недостатком его, помимо малой чувствительности, является постепенное оседание частичек под действием силы тяжести. На рис. 59 показаны изображения железных луженых пластинок, полученных методом взвеси. Хорошо видно, что на двух пластинках (рис. 59, *а* и *б*) слой полуды не везде плотно сцепился с поверхностью железа, тогда как на третьей пластинке (рис. 59, *в*) видно хорошее прилегание полуды по всей поверхности.

Все рассмотренные до сих пор методы визуализации относились к типу «матового стекла». Методы типа «фотопластинки» основываются на тепловом и химическом воздействии ультразвука. Если поместить в фокальной плоскости линзы слой хорошо поглощающего ультразвук материала, например прорезиненной ткани, то по площади звукового изображения ткань вследствие поглощения ультразвука нагреется. Звуковое изображение перейдет в тепловое, которое может быть сделано видимым при помощи термочувствительной краски. Термочувствитель-

ные краски обладают свойством менять свой цвет под действием температуры, и если такой краской покрыть прорезиненную ткань, тепловое изображение станет видимым. Этот метод при своей крайней простоте, к сожалению, не очень чувствителен. Однако не исключена возможность создания новых термочувствительных красок, обладающих большей чувствительностью.

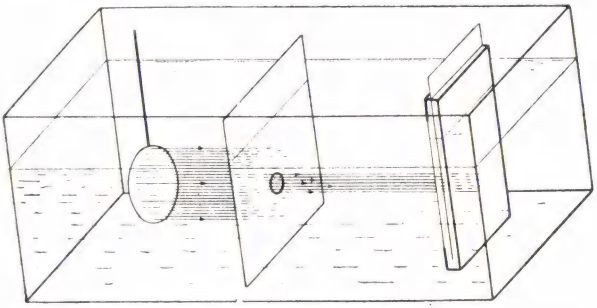


Рис. 60. Схема фотодиффузионного метода

Из химических методов визуализации упомянем лишь о методе йодокрахмальных пластинок. Известно, что крахмал в присутствии йода окрашивается в синий цвет. Стеклянная пластинка с нанесенным на нее тонким слоем крахмала при погружении в воду, в которую добавлен спиртовый раствор йода, быстро синеет. При небольшом количестве йода процесс окрашивания пластинки идет крайне медленно. Но если к поверхности такой пластинки подвести звуковое изображение, то в местах его приложения начнется энергичное посинение, так как ультразвук ускоряет химические реакции, в том числе и реакцию йод — крахмал, и через некоторое время мы увидим синее изображение на светло-голубом фоне.

Очень прост так называемый фотодиффузионный способ, основанный на ускорении под действием ультразвука диффузии проявляющего раствора в светочувствительный слой. Засвеченная фотобумага, помещенная в раствор проявителя, как известно, сейчас же чернеет. Если уменьшить концентрацию проявителя, то этот процесс почернения можно очень сильно замедлить и довести его длительность

до нескольких десятков минут. Совместим теперь эту очень медленно чернеющую бумагу со звуковым изображением; в тех местах, где на бумагу будут воздействовать ультразвуковые волны, процесс проявления ускорится, и через 30—40 сек. на бумаге появится четкое видимое изображение, полностью соответствующее исходному звуковому изображению. Теперь остается быстро вынуть бумагу из проявителя, чтобы не почернела остальная ее часть, и положить в обычный фиксаж.

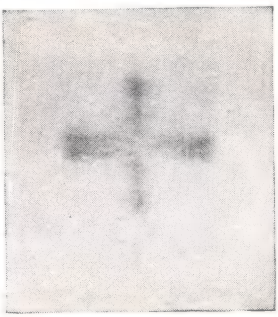


Рис. 61. Изображение крестообразного выреза в металлической пластинке

Практически фотодиффузионный метод осуществляется следующим образом (рис. 60): фотобумага помещается в специальную кассету, передняя стенка которой представляет собой очень тонкую, прозрачную для ультразвука нейлоновую или резиновую пленку. В кассету наливается разбавленный раствор проявителя, и вся кассета помещается в нужное место ванны. На рис. 61 показано изображение крестообразного выреза в пластинке, полученное этим способом.

Ультразвук оказывает непосредственное воздействие и на фоточувствительные слои. После длительного облучения ультразвуком на фотографической пластинке получается такое же почернение, как и после воздействия светового луча. Однако для получения изображения хорошего качества требуется воздействие мощного ультразвука в течение нескольких часов. Природа этого явления до сих пор еще не ясна.

Тепловым воздействием ультразвука объясняется также его влияние на люминесценцию. Существует ряд способов использования этого свойства ультразвука. В одних случаях нагревание ослабляет (гасит) люминесценцию, в других, наоборот, усиливает, и тогда получается светлое изображение на темном фоне.

Все перечисленные выше способы пригодны лишь при использовании сравнительно интенсивных ультразвуков. Так, тепловые и химические способы требуют интенсив-

ности 0,5—5 *вт/см*^{2}, метод поверхностного рельефа — около 0,01 *вт/см*^{2}. Несколько чувствительнее теневой метод, порог которого составляет около 0,001 *вт/см*^{2}, но он обладает рядом неудобств, вытекающих из трудности, а часто невозможности совмещения звуковой и оптической аппаратуры. Для сравнения напомним, что

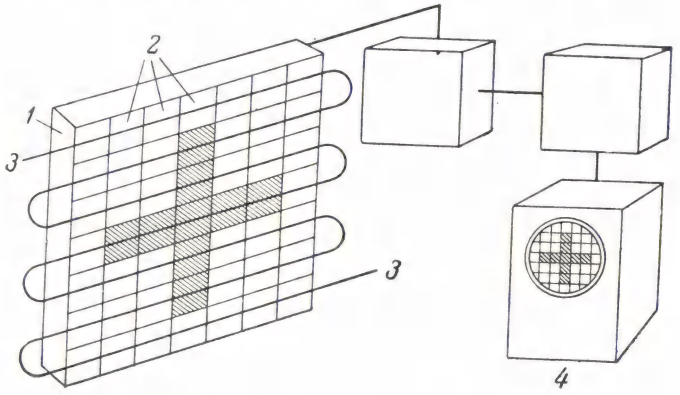


Рис. 62. Схема метода мозаики:

1 — приемная мозаика; 2 — отдельные элементы; 3 — ход коммутации; 4 — электронно-лучевая трубка с видимым изображением

порог чувствительности нашего глаза составляет около 10^{-14} *вт/см*^{2}, т. е. глаз в 10^{10} раз чувствительнее самого чувствительного (теневого) метода визуализации.

Такая малая чувствительность перечисленных выше методов объясняется тем обстоятельством, что все они основаны на различных вторичных эффектах, создаваемых ультразвуком, а мы уже знаем, что вторичные эффекты малы. Можно ожидать, что методы, использующие основной эффект звукового поля — переменное звуковое давление, будут значительно более чувствительны. Осуществление простейшего из таких методов схематически показано на рис. 62. В фокальной поверхности линзы помещается мозаика, составленная из пьезоэлектрических приемников звука. Звуковое изображение заставляет колебаться те приемники, которые попадают в зону изображения, причем интенсивность этих колебаний определяется интенсивностью соответствующей части изображения. Под

действием этих колебаний на приемничках появится электрическое напряжение: вместо звукового изображения мы получим электрическое. Превращение электрического изображения в видимое решается техникой современного телевидения.



Рис. 63. Изображение проволочных крючков, полученное «ультразвуковым микроскопом» С. Я. Соколова

Аналогия между обычным телевидением и описываемым здесь «звуковидением» настолько велика, что прибор, воспринимающий звуковое изображение и преобразующий его в последовательность электрических импульсов, естественно назвать «ультразвуковым иконоскопом».

Впервые такой прибор предложил С. Я. Соколов, назвав его ультразвуковым микроскопом. На рис. 63 показано изображение двух проволочных крючков, полученных этим интересным и многообещающим методом. Исследования подтвердили сделанное выше предположение о высокой чувствительности этого метода. На рис. 64 показан звуковой иконоскоп (электронно-акустический преобразователь), разработанный Акустическим институтом



Рис. 64. Внешний вид электронно-акустического преобразователя большой чувствительности

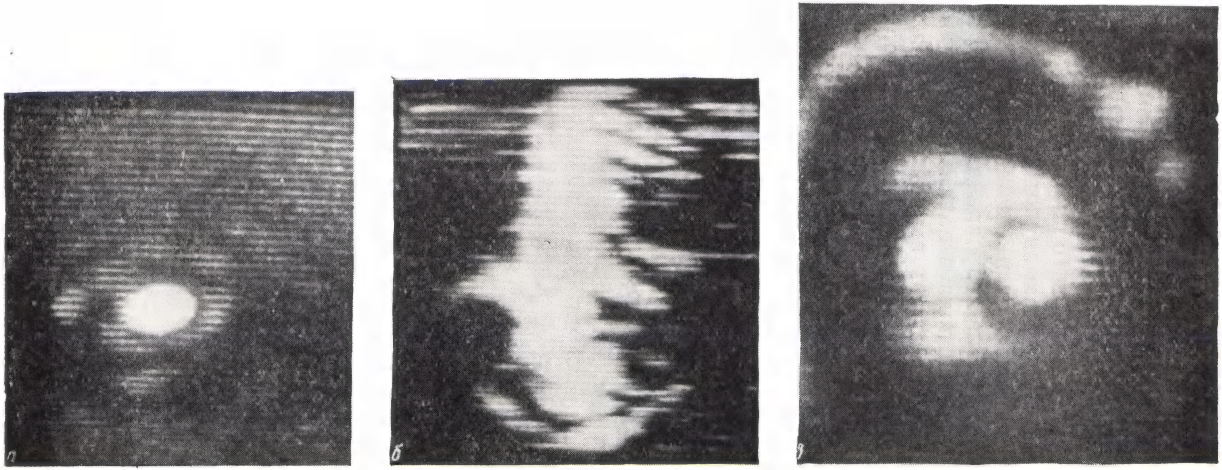


Рис. 65. Образцы звуковых изображений:
а — шарик; б — цилиндр; в — два отверстия в непрозрачном экране

и Институтом металлургии Академии наук СССР. Его чувствительность оказалась равной 10^{-9} *вт/см*^{2}, т. е. в 100 тысяч раз выше, чем у наиболее чувствительного из описанных выше методов визуализации. На рис. 65 показаны образцы изображений, полученные при помощи ультразвукового иконоскопа.

Получение звуковых изображений и их визуализация являются очень мощным методом изучения структуры оптически непрозрачных сред. Развитие этого метода находится пока в начальной стадии, техника его далека от совершенства: звуковые изображения пока еще сильно уступают привычным нам световым изображениям. Но не следует забывать, что и первые телевизионные изображения, полученные при помощи диска Нипкова и неоновой лампы, были совершенно не похожи на то, что мы наблюдаем на экране современного телевизора. А ведь со времени первых телевизионных опытных передач прошло всего 25 лет! Есть все основания надеяться, что метод звуковых изображений, который существует только несколько лет, будет интенсивно развиваться, а качество самих изображений — улучшаться.

ГЛАВА

V

Воздействие ультразвука на вещество

До сих пор мы рассматривали ультразвук малой интенсивности. Такие слабые ультразвуковые волны не вызывают необратимых изменений в средах, через которые они распространяются. Интенсивные ультразвуки ведут себя иначе: они могут вызывать перемешивание жидкостей, создавать звуковые фонтаны, в сильных ультразвуковых полях отдельные частицы могут приобретать огромные ускорения и, наконец, во время фаз разрежения (отрицательных фаз давления) могут возникать кавитационные пузырьки, появление и особенно захлопывание которых вызывает серию механических и химических эффектов.

Все эти явления, как оказывается, могут быть использованы для решения самых разнообразных технических задач. Основанные на них применения ультразвука называют активными применениями, так как в этих случаях ультразвук активно видоизменяет среду, в которой распространяется. Одно только перечисление предложенных до настоящего времени способов практического применения мощных ультразвуков заняло бы больше страницы, но от предложения еще далеко до его реализации. Далеко не все, что предлагается и осуществляется в лабораторных условиях, может быть перенесено в производство. Однако некоторые применения оказались настолько эффективными,

что уже получили широкое распространение, и здесь практика сильно опередила теорию: порой ультразвук исправно выполняет возложенные на него задачи, в то время как механизм самого процесса часто не ясен не только в деталях, но иногда и по существу.

Объяснение того или иного действия ультразвука, вероятно, сможет не только помочь значительно улучшить известные, но и создать новые, более рационально сконструированные установки.

Очистка газов

Очень мелкие частицы твердых веществ или капельки жидкости, находящиеся в газообразной среде, не оседают и держатся в течение продолжительного времени во взвешенном состоянии, образуя так называемые аэрозоли. Чем меньше частицы, образующие аэрозоль, тем дольше последние могут существовать.

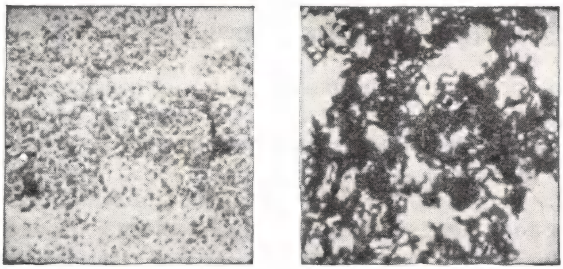
Примерами аэрозолей являются туман, представляющий собой взвешенные в воздухе мельчайшие капельки воды, а также промышленные дымы, состоящие из твердых или жидких частиц, получившихся в результате неполного сгорания либо не прошедшей до конца химической реакции. Осаждение аэрозолей является очень важной промышленной задачей как с точки зрения очистки атмосферы городов и заводских поселков, так и с точки зрения улавливания полезных и ценных продуктов, уносимых в буквальном смысле слова «в трубу».

Однако все существующие методы осаждения аэрозолей, как, например, механические фильтры (циклоны), электрофильтры и другие не улавливают частицы, размеры которых меньше чем 1—3 *мк*, хотя такие мелкодисперсные аэрозоли часто встречаются в практике (сажа, цемент, сернокислотный туман и т. д.).

Облучение аэрозоля звуковыми колебаниями повышает число столкновений отдельных частиц друг с другом; в том случае, когда эти частицы по своей природе могут слипаться, они в результате этих столкновений образуют сравнительно большие комки, которые могут быть уловлены обычными фильтрами (рис. 66). Если же частицы сами по себе не склеиваются, как, например, зола, цемент

и т. д., то образовавшиеся комки быстро распадаются опять на мельчайшие частицы, и процесс укрупнения (коагуляция) становится мало эффективным. Иногда в таких случаях помогает введение какого-либо вещества, улучшающего слипание частиц в комки, например впрыскивание водяного тумана.

Таким образом, акустический метод очистки дымов не является универсальным и не может заменить другие



а *б*

Рис. 66. Микрофотографии дыма:
а — до облучения ультразвуком; б — после облучения

методы очистки, а только дополняет их. В связи с невысоким пока еще (20—40%) кпд источников звука акустический метод не очень экономичен; расход электроэнергии для очистки 1000 $м^3$ газа составляет несколько киловатт-часов. Поэтому применение его оправдывает себя при улавливании ценных продуктов, как, например, при выплавке полиметаллических руд или в тех случаях, когда уносимые аэрозоли опасны для живой природы.

Причины, непосредственно вызывающие сближение отдельных частичек, пока еще не ясны: существует лишь ряд гипотез. Однако экспериментально установлено, что для нормального хода коагуляции необходима интенсивность в пределах 0,1—1,0 $вт/см^2$, причем минимальное содержание твердого или жидкого вещества не должно быть менее 1 $г/м^3$. При этих условиях коагуляция происходит через несколько секунд.

Что касается наилучшей частоты, то она зависит от исходных размеров частичек аэрозоля и от его типа, но,

как правило, лежит в области слышимых звуков — 2000—8000 *гц*. Поэтому приходится применять специальную звукоизоляцию для снижения звука, проникающего в окружающее пространство, либо переходить в неслышимую ультразвуковую область, где процесс идет менее эффективно.

В качестве источников звука применяются сирены и батарейные свистки.

К положительным качествам метода следует отнести его взрывобезопасность и возможность работы при повышенных температурах и давлениях, а также в агрессивных средах.

Недавно в Гипроникеле была сконструирована портативная установка для очистки воздуха в шахтных условиях. Она улавливает (в зависимости от исходной запыленности) от 99,5 до 99,98% пыли, образующейся при бурении.

Чехословацкие ученые предложили видоизменение метода, позволяющее очищать газы от газовых примесей. Для этого они вводят в газ, подлежащий очистке, специальные химические добавки, реагирующие с газом, подлежащим удалению, так что в результате этой реакции образуются жидкие капельки — туман. Последние коагулируют в звуковом поле и затем осаждаются механическим фильтром.

Ускорение сушки

Сушка является одним из наиболее распространенных технологических процессов. Во время сушки жидкость, которую мы хотим удалить, испаряется и в виде паров смешивается с газом, в атмосфере которого идет процесс. Как правило, сушка идет довольно долго и поэтому всякое ее ускорение весьма существенно для сокращения рабочего цикла. Одним из действенных способов ускорения сушки является повышение температуры. Однако далеко не все вещества и соединения допускают такое повышение: многие полезные и ценные продукты портятся или теряют свои свойства при нагревании. Другой возможностью ускорения является сушка под вакуумом, однако она сложна и тоже не всегда применима.

Оказывается, что облучение мощным звуком (или ультразвуком) также обладает свойством ускорять процесс сушки. Первые опыты, произведенные в 1957 г. в Венгрии, показали, что трехминутное облучение слоя хлопка-сырца на частоте 20—25 *кгц* при интенсивности 0,01—0,1 *вт/см*^{2} снижает его влажность на 30%. Облучение производили ультразвуковой сиреной, расходующей около 3,5 *м*^{3} воздуха в минуту. Затем были проведены удачные пробы сушки различных сыпучих материалов, таких, как коллоидальная гидроокись циркония, суспензия двуокиси титана и др. Наряду с этим проверяли возможность сушки фоточувствительных слоев, а также свежих фруктов. Все эти опыты дали положительные результаты и выявили, что наилучший эффект получается на частотах 6—8 *кгц*. Наименьшая интенсивность, при которой действие звука делается заметным, составляет около 0,03 *вт/см*^{2}. Физическая сторона процесса пока еще не ясна; можно, однако, предполагать, что звуковые волны вызывают воздушные потоки (звуковой ветер), омывающие объект сушки, и тем самым ускоряют испарение.

Примерная конструкция роторной звуковой сушилки для сыпучих тел показана на рис. 67. Она обеспечивает равномерное перемешивание и хорошее облучение звуком всей массы. В качестве источников звука могут применяться как сирены, так и батарейные свистки с кпд около 20%.

Особенное значение звуковая сушка приобретает для тех веществ, которые не переносят нагрева, как, например, лекарственные вещества (ферменты, гормоны и т. д.). Так, для одного из таких чувствительных к теплу гормонов применение звука сократило процесс сушки с одного часа до 20 мин. Другим ярким примером является сушка силикагеля — абсорбента, широко использующегося в химической промышленности. Сушка его под вакуумом до 5 мин. удаляет 5% содержащейся в нем воды; нагрев до 95° увеличивает эту цифру лишь до 10%, тогда как звуковое облучение с интенсивностью 0,05 *вт/см*^{2} удаляет 40% влаги, с интенсивностью 0,15 *вт/см*^{2} — 80%; за время облучения в 15 мин. эти цифры возрастают соответственно до 70 и 100%.

Расход энергии при этом складывается из следующих данных: батарейный свисток, работающий на частоте 6,9 *кгц* и расходующий 1 $м^3$ воздуха в минуту (что соответствует акустической мощности 60 *вт*), за 15 мин. высушивает 40 *г* силикагеля.

Эти результаты могут быть еще улучшены при совместном действии звука и нагрева или вакуума.

Звуковая сушка может быть применена и для листовых материалов: асбестовый картон толщиною 7 *мм* полностью

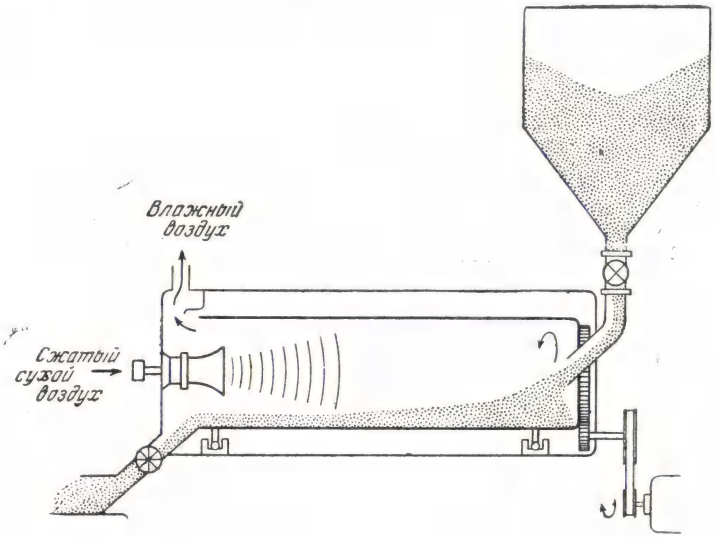


Рис. 67. Схема акустической роторной сушилки

просушивается за 4 мин. при интенсивности звукового облучения 0,03 $вт/см^2$.

Очень удобно применять звук для сушки суспензии — мелких частиц, взвешенных в газовой среде. Хотя звуковая сушка является одним из самых молодых практических применений ультразвука, уже сейчас видно, что это очень интересное новое направление, особенно перспективное для сушки материалов, не переносящих высоких температур, как, например, лекарственные вещества и пищевые продукты.

Дегазация жидкостей

Под действием ультразвука слипаются не только частички аэрозолей, но и пузырьки газа, находящиеся в жидкостях. Наличие таких пузырьков очень нежелательно в ряде производственных процессов. Например, пузырьки, образовавшиеся во время варки стекла и застрявшие в стекломассе, делают его в ряде случаев непригодным. Пузырьки, образующиеся в расплавленных металлах и оставшиеся в виде раковин в затвердевших отливках, ослабляют прочность этих отливок.

Воздействие ультразвука на расплавленную стекломассу или расплавленный металл приводит к тому, что пузырьки (подобно частичкам аэрозоля) притягиваются друг к другу, слипаясь, образуют большие пузыри, которые легче выходят из жидкости, и, таким образом, расплав дегазируется.

На рис. 68 показаны кадры высокоскоростной киносъемки движения воздушных пузырьков в воде под действием звукового поля. Интервалы между отдельными кадрами соответствуют 1/10 000 сек., а время экспозиции каждого кадра — 1/30 000 сек.

Хорошо видно постепенное сближение пары пузырьков в середине. Изучение полученных результатов позволило разобраться в физике этого процесса. Оказалось, что основную роль играют колебания самих пузырьков под действием звуковых волн, причем именно такие колебания, при которых пузырьки периодически сжимаются и расширяются. В результате этих колебаний между пузырьками возникают силы взаимного притяжения, приводящие к их сближению.

На рис. 69 показан разрез отливки из сплава алюминия с марганцем, полученной обычным способом (рис. 69, *а*) и подвергавшейся перед застыванием в течение часа воздействию ультразвуковых колебаний (рис. 69, *б*). В первом случае получаются раковины, во втором они отсутствуют.

Введение ультразвуковых колебаний в расплав, находящийся при высокой температуре, производится при помощи специальных жаростойких приставок к излучателям.



Рис. 68. Сближение воздушных пузырьков в воде под действием мощного звука частотою 8 кгц

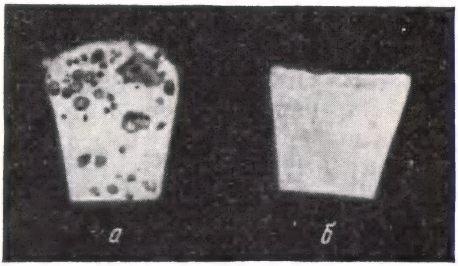


Рис. 69. Разрез отливки из сплава алюминия и марганца:

а — при обычном застывании; б — при застывании после облучения расплава ультразвуком

Получение суспензий и эмульсий

Огромное давление, которое развивается при захлопывании кавитационных пузырьков, может быть использовано для раздробления и размельчения различных веществ.

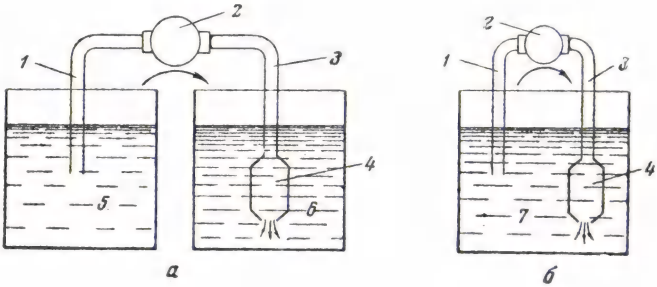
При крашении тканей существенное значение имеет дисперсность частиц пигмента красителя. Чем эти частицы меньше, тем ярче и насыщеннее получается цвет при меньшем расходе красителя. В Научно-исследовательском институте искусственного волокна были поставлены опыты с ультразвуковым измельчением одного из красителей, применяющегося для окраски вискозы. Размеры частичек этого красителя колеблются в довольно широких пределах: примерно 50% частичек имеют размеры меньше 1 *мк*, 30% — больше 20 *мк*. После же облучения красителя ультразвуком частотой 50 *кгц* — 90% всех частичек имели размер меньше 1 *мк* и лишь 2% — больше 20 *мк*.

Таким образом, после обработки ультразвуком размеры частичек заметно уменьшаются, и краситель делается более однородным по своей структуре. Об экономичности этого процесса можно судить по следующим данным опыта: для обработки 2 *л* этого красителя требовалось 15-минутное облучение при звуковой мощности 150 *вт*.

Аналогичным образом можно измельчать порошки металлов, керамики, абразива и других материалов.

Дробящее действие ультразвук оказывает не только на твердые тела, находящиеся в жидкости, но и на несмешивающиеся между собой жидкости. Известно, например, что если налить ртуть и воду в один сосуд, то между ними будет существовать резкая граница раздела, так же как между водой и маслом. Воздействуя на эту смесь ультразвуком, можно разбить жидкость на мельчайшие капли и образовать взвесь капелек одной жидкости в другой. Такие взвеси несмешивающихся жидкостей носят название эмульсий и широко применяются в различных отраслях техники. Облучение ультразвуком — одно из лучших средств для приготовления эмульсий. Капельки получаются при этом очень мелкими и одного размера. Эмульсия получается очень устойчивой и может сохраняться в течение долгого времени.

Для получения эмульсии ультразвуковым способом очень удобно применять уже описанный выше жидкостный свисток. В ванну, в которой изготовляется эмульсия,



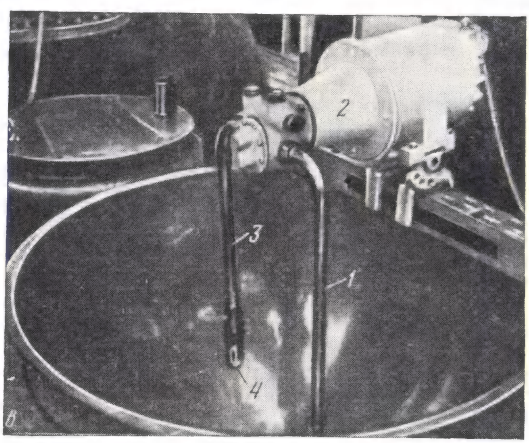
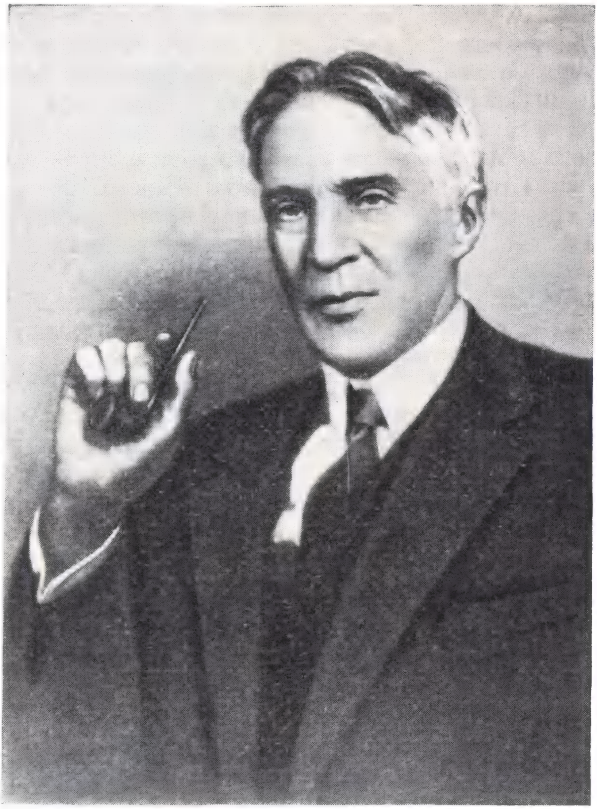


Рис. 70. Установка для получения эмульсии масла в воде, с использованием ультразвукового свистка:

а, б — схема опыта; в — общий вид установки.
1 — засасывающая труба; 2 — насос; 3 — нагнетающая труба; 4 — свисток; 5 — масло; 6 — вода; 7 — эмульсия

наливают одну из жидкостей, а другую, эмульсию которой хотят получить, прогоняют под давлением через свисток (рис. 70, *а*). При этом создаются особые благоприятные условия, и процесс образования эмульсии идет



Роберт Вуд
(1868—1955)

очень быстро. Например, 50 *л* эмульсии масла в воде можно получить меньше чем за одну минуту. Иногда полученную таким образом эмульсию еще раз пропускают через свисток (рис. 70, *б*). На рис. 70, *в* показана такая установка.

Труднее всего получать эмульсии из жидкостей, которые резко различаются по своему удельному весу, например, эмульсию ртути в воде или воды в ртути. Для того чтобы такая эмульсия была устойчивой, она должна быть очень мелкодисперсной; в противном случае частицы быстро выпадут вниз или поднимутся вверх. Ультразвук дает возможность очень мелко диспергировать жидкости и, следовательно, позволяет решить поставленную выше задачу. Получение таких эмульсий имеет значение в химической промышленности; дело в том, что чем мельче диспергирована одна жидкость в другой, тем больше поверхность соприкосновения между ними, и тем быстрее идет нужная химическая реакция. Но, как уже говорилось выше, обычными способами удавалось получить лишь эмульсии из жидкостей приблизительно одинакового удельного веса. Лишь ультразвук позволяет получать эмульсии легких жидкостей в тяжелых и наоборот, как, например, азотная кислота — параксилол, азотная кислота — циклогексан, вода — эфирные масла и т. д. Можно даже получить водяную эмульсию такой тяжелой и вязкой жидкости, как смола.

Гомогенизация

Воздействие ультразвуковых волн не только дробит среду на мелкие кусочки, но и хорошо перемешивает всю массу, которая в результате этого приобретает большую степень однородности. В технологии такой процесс носит название гомогенизации и широко применяется в химической и пищевой промышленности. Гомогенизированные пищевые продукты приятнее на вкус и легче усваиваются организмом. При помощи ультразвука проще всего гомогенизировать жидкости, так как для этой цели можно использовать жидкостные свистки. Были проведены удачные опыты гомогенизации молока, которое, правда, на первый взгляд и так достаточно однородно. Однако оказывается,

что после ультразвуковой гомогенизации содержащиеся в молоке жировые шарики размельчаются и молоко значительно лучше усваивается организмом. На рис. 71 показан внешний вид гомогенизатора, состоящего из жидкостного свистка и питающего его насоса с мотором.

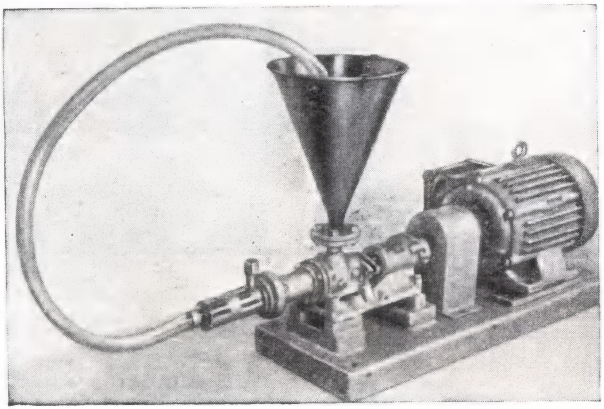


Рис. 71. Ультразвуковой гомогенизатор

Вязкие жидкости и полужидкие массы не могут быть применены в таких гомогенизаторах, так как они не в состоянии возбудить жидкостный свисток. В этих случаях приходится применять магнитострикционные излучатели, создающие звуковое поле в обрабатываемой среде. Так как ультразвуковая энергия, вырабатываемая такими излучателями, существенно дороже, чем получаемая от гидродинамических излучателей, то промышленное применение гомогенизации вязких жидкостей оправдывается только для более дорогих продуктов, для которых затраты на гомогенизацию малы по сравнению со стоимостью самого продукта.

Сравнительно широкое распространение получила гомогенизация жидкой шоколадной массы — так называемое ультразвуковое конширование, т. е. облучение ультразвуком во время механического перетирания и перемешивания на конш-машинах. Успешно применяется

ультразвук также и для гомогенизации лекарственных и косметических кремов. Гомогенизация может быть применена и для получения однородных сплавов различных металлов. В обычных условиях это очень сложно из-за различных плотностей и температур плавления компонен-

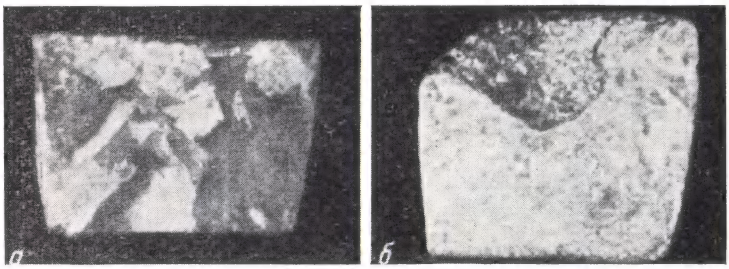


Рис. 72. Слиток сплава олово — цинк:
а — выплавленный в обычных условиях; б — выплавленный при облучении ультразвуком

тов сплава. На рис. 72 слева показан слиток сплава олово — цинк, отлитого при температуре 500°. Темные и светлые пятна — это неперемешавшиеся массы олова и цинка; справа показан тот же сплав, отлитый при той же температуре, но при облучении ультразвуком. Мы видим действительно равномерное перемешивание очень мелких кристалликов составных частей. Конечно, описанные выше ультразвуковые гомогенизаторы не пригодны для обработки расплавленных металлов при высоких температурах: здесь необходима иная техника, которая будет описана ниже.

Изготовление аэрозолей

Распыление жидкостей в поле ультразвукового фонтана применяется для получения аэрозолей лекарственных веществ, предназначенных для введения в организм путем вдыхания. Очевидно, решающим является возможность получения очень маленьких и одинаковых по своему размеру капелек жидкости. Дело в том, что при вдыхании

(ингаляции) сравнительно крупных капелек последние оседают в верхних дыхательных путях и не доходят до легких. Капельки размером более 30 *мк* не проникают далее верхних дыхательных путей; до бронхов доходят капельки размером 5—30 *мк*. Только аэрозоль с размерами капель 0,5—5 *мк* доходит до наибольшей глубины легких—до альвеолярных пузырьков.

При ультразвуковом распылении на частоте 2—3 *Мгц* более 70 % всей жидкости превращается в капельки размером 0,5—5 *мк*. При других способах распыления, например с помощью форсунки, таких маленьких капелек образуется всего лишь 20—25% — три четверти жидкости бесполезно пропадает.

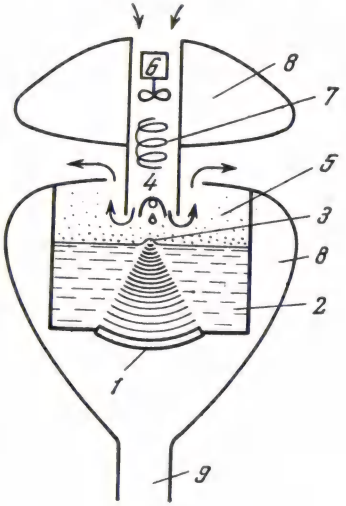


Рис. 73. Устройство ультразвукового ингалятора. Стрелками показано направление воздушного потока:

1—вогнутая фокусирующая пластинка из титаната бария; 2 — распыляемая жидкость; 3 — ультразвуковой фонтан; 4 — отражатель крупных капель; 5 — аэрозоль; 6 — вентилятор; 7 — нагревательная спираль; 8 — кожух; 9 — стойка

Для создания ультразвукового фонтана обычно используются вогнутые сферические излучатели из керамики титаната бария, фокальная точка которых совмещается с поверхностью распыляемой жидкости. Крупные капли при помощи специального отражателя отбрасываются обратно, а получившийся туман струей нагретого воздуха разгоняется по помещению, в котором сидят пациенты.

Устройство такого ультразвукового ингалятора показано на рис. 73, а его внешний вид и действие — на рис. 74, где он показан в ингалятории, предназначенном для лечения силикоза — заболевания, вызываемого попаданием мелкой кремниевой пыли в легкие.



Рис. 74. Ультразвуковой ингалятор в действии

Разрушение пограничного слоя

Почему осаждается накипь в чайнике? Ведь находящаяся там вода все время перемешивается и бурлит? Кроме того, чайник моют и споласкивают. И, несмотря на это, в нем образуется слой накипи такой прочности, что для его удаления требуются большие механические усилия или помощь химии — растворение этого слоя раствором соляной кислоты. Разгадка этого явления заключается в том, что когда жидкость течет вдоль границы твердого тела, то скорость ее течения вблизи этой границы меньше, чем вдали от нее, а на самой границе скорость течения равна нулю. Этот известный эффект обязан своим происхождением вязкости, которой обладает жидкость, и в силу чего частицы жидкости, непосредственно прилегающие к твердой границе, как бы прилипают к ней, образуя тонкую застойную зону, так называемый пограничный слой, сохраняющийся при механическом перемешивании жидкостей. Толщина пограничного слоя растет с увеличением вязкости жидкости и степени шероховатости прилегающей поверхности.

Если выпавшие при испарении воды кристаллики солей, образующих накипь, находятся далеко от стенки — они уносятся потоком воды. Но стоит им попасть к стенке, как они замедляют свое движение, попадают в пограничный слой и в его застойной воде плотно прирастают к стенке или к уже выпавшему ранее слою накипи. Так как накипь садится неравномерно, то по мере ее выпадения поверхность стенки делается все более и более шероховатой, толщина пограничного слоя растет и процесс выпадания накипи ускоряется.

Наличие пограничного слоя может быть источником многих технических неудобств и неприятностей. Именно этим и объясняется образование накипи в чайниках и в паровых котлах. Если образование накипи в чайнике не может привести к сколько-нибудь существенным неприятностям, то ее отложение на стенках парового котла, в силу плохой теплопроводности, резко снижает эффективность его работы и может быть даже источником взрыва котла.

Примерно также проходит и другой неприятный процесс — обрастание корпуса судна. Конечно, на ходу ко-

рабль обрастает медленнее, чем во время стоянки в гавани, но и на ходу, в результате наличия тонкого пограничного слоя на всей поверхности его корпуса, попавшие туда мелкие растительные и животные зародыши плотно прирастают к его поверхности.

Очистка корпуса корабля, равно как и удаление накипи из котла или из труб, представляет собой длительную и трудоемкую работу; делалось много попыток предотвращения осаждения накипи и обрастания корпуса корабля, однако никаких существенных результатов эти попытки не дали.

Первые же пробы применения ультразвука показали, что он может радикально изменить положение. Если стенкам котла или корпусу корабля, при помощи прикрепленных к ним вибраторов, сообщить ультразвуковые колебания, то процесс осаждения или обрастания замедляется в десятки раз, и громоздкие операции очистки могут производиться значительно реже. Так как процесс прирастания идет медленно, то ультразвуковые вибрации даже не обязательно подводить непрерывно, а можно это делать порциями-импульсами несколько раз в секунду, подводя ультразвуковые колебания частотою около 20—25 *кгц*. Аналогичный способ может быть с успехом применен также и для предотвращения осаждения парафина на стенках различных нефтепроводов.

В последнее время в литературе появились сообщения о применении ультразвука для предотвращения загрязнения фильтровальных сеток. Соответствующая схема показана на рис. 75. Она может быть выполнена в двух вариантах: облучение ультразвуком той зоны сетки, на которой осаждается фильтрат (рис. 75, *а*) или механическое встряхивание самой сетки (рис. 75, *б*).

Каков же механизм действия ультразвука в рассмотренных случаях?

Пока еще на этот вопрос нельзя дать четкого и полного ответа. Однако последние исследования позволяют пролить некоторый свет на описанные эффекты.

Здесь сразу следует отделить чисто физические факторы, действующие во всех перечисленных выше примерах, от факторов физиологических, несомненно играющих роль в случае обрастания корпуса корабля. Можно предположить, что животные и растительные зародыши, в силу

выработавшегося тысячелетиями инстинкта, «предпочитают» прикрепляться к спокойной поверхности и «избегают» связывать свою судьбу с вибрирующей. Это обстоятельство, конечно, усиливает действие физических факторов, препятствующих обрастанию, но, по-видимому,

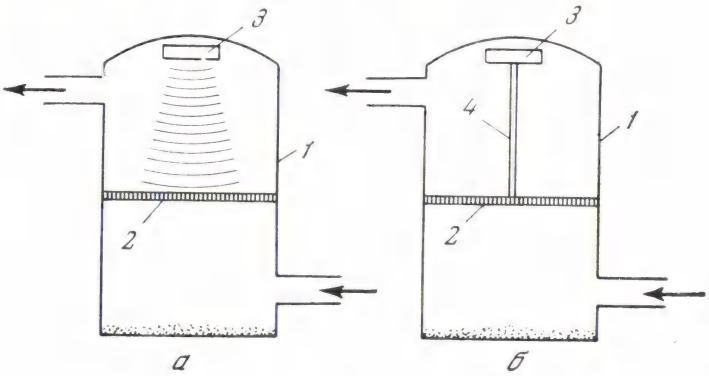


Рис. 75. Схема ультразвукового ускорения процесса фильтрации:

1 — корпус фильтра; 2 — фильтрующий элемент; 3 — излучатель; 4 — жесткий стержень

не является основным, так как и при осаждении механических частиц, например в случае выпадения накипи, применение ультразвука все равно дает нужный эффект.

Как же можно представить себе физический механизм действия ультразвука в данном явлении?

Первое объяснение, которое приходит в голову,— это действие звукового ветра. Но звуковой ветер — это течение, и как всякое течение, оно образует свой пограничный слой. Таким образом, «основной» звуковой ветер, возникающий от источника ультразвука, не может ничем помочь.

В результате дегазирующего действия ультразвука, как мы уже знаем, в жидкости образуются газовые пузырьки; эти пузырьки частично оседают на твердых поверхностях, соприкасающихся с жидкостью. Когда на них попадает звуковая волна, пузырьки эти начинают колебаться.

Недавние исследования показали, что в результате колебаний сидящих на твердой поверхности пузырьков возникают местные микротечения (рис. 76) . Эти течения зарождаются на самой границе и могут поэтому вызвать местные нарушения пограничного слоя, так сказать, всколыхнуть застойную зону.

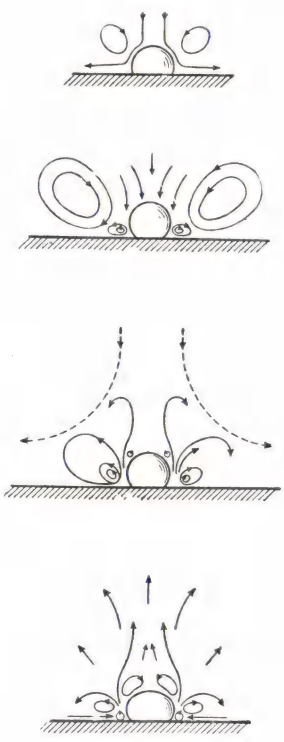


Рис. 76. Микротечения у поверхности твердого тела, вызываемые колеблющимися пузырьками

Имеющиеся в нашем распоряжении данные пока недостаточны, чтобы сказать, насколько существен описанный выше механизм нарушения пограничного слоя, или он является второстепенным, но, несомненно, что с микропотоками, возбуждаемыми колеблющимися резонансными пузырьками, нельзя не считаться.

Быстрое разрушение пограничного слоя существенно также и для такой операции, как закалка, например, стали и ее сплавов. Как известно, для получения хорошей закалки, нужно осуществить очень быстрое охлаждение поверхности закаливаемого изделия, чтобы внезапно остывшая структура поверхностного слоя сохранила структуру, характерную для высокой температуры. Поэтому, когда сильно нагретое изделие опускают в охлажденную ванну, нужно обеспечить быстрое удаление как прилегающего к изделию уже нагревшегося слоя жидкости, так и образовавшегося на границе твердое тело—жидкость слоя газа и пара.

Опыт показал, что и здесь введение ультразвука дает существенно лучшие результаты, нежели простое механическое перемешивание, особенно при применении вязкого масла, например парафинового. На рис. 77 изобра-

жено распределение твердости в закаленном стальном стержне при различных процессах закалки. Облучение производили магнитострикционным генератором, работающим на частоте около 20 *кгц*. Хорошо видно, какое увеличение твердости дает перемешивание и какое — ультразвук.

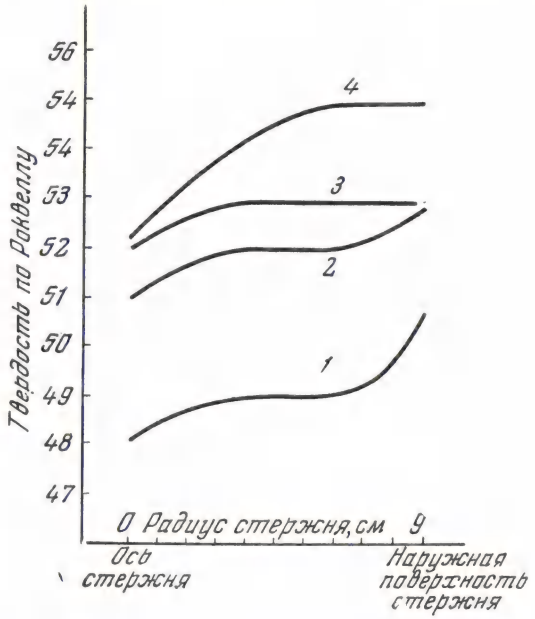


Рис. 77. Распределение твердости по радиусу стального стержня диам. 17,5 мм, закаленного в парафиновом масле:

1 — обычная закалка; 2 — механическое перемешивание; 3 — воздействие ультразвука; 4 — перемешивание

Так как эти процессы не заменяют друг друга, а дополняют, то одновременное их применение дает наилучшие результаты.

Опыт показал также, что при облучении ультразвуком получается более равномерное распределение твердости по поверхности закаливаемого изделия. Наконец, оказалось, что стержень, подвергшийся ультразвуковой

закалке, уносит из ванны в 2 раза меньше приставшего к нему масла и тем самым в 2 раза уменьшается расход масла, заливаемого в закалочную ванну.

Разрушением пограничного слоя можно объяснить и ускорение процесса растворения под действием ультразвуковых волн: об этом более подробно будет сказано ниже, в разделе, посвященном ультразвуковой очистке.

Ускорение диффузионных процессов

Процессы, связанные с диффундированием жидкости в пористые среды, широко используются в современной технологии: при дублении и окраске кожи, пропитке и окраске тканей, окраске мехов, пропитке кабельной изоляции, мойке тканей и т. п. Как правило, все эти процессы протекают очень медленно.

Время, затрачиваемое на полный производственный цикл обработки меховых овчин, состоящий из мойки, обезжиривания, дубления и крашения, а также ряда вспомогательных (загрузка и выгрузка) и промежуточных операций, занимает около 10 суток. Анализ показывает, что причиной столь большой продолжительности основных процессов является очень медленная диффузия, т. е. проникновение рабочего вещества в обрабатываемый материал, в данном случае в мех и в кожу овчины.

Действие ультразвука очень существенно ускоряет эти процессы; так, например, процесс мойки овчины сокращается при облучении ультразвуком с 10 до 2 час., процесс дубления — с 10 до 4,5 час., процесс крашения — с 4 до 1 часа и т. д. В целом, как показали проведенные недавно опыты на одном из заводов, полный производственный цикл может быть сокращен на 30—40%, что позволяет при том же оборудовании и тех же площадях соответственно увеличить производительность предприятия. Кроме того, ультразвуковое облучение улучшает качество продукции и позволяет добиться большей однородности.

Одним из возможных объяснений наблюдаемого ускорения является диспергирование в поле ультразвука рабочего раствора или твердых частиц рабочего вещества. Известно, что частицы или капельки меньшего размера

более подвижны и поэтому быстрее диффундируют и, кроме того, быстрее реагируют, так как скорость реакции увеличивается с ростом поверхности соприкосновения, которая у мелкодиспергированных частиц или капелек относительно больше (при той же общей массе), чем у крупных. Действительно, специально проделанные опыты показали, что если, например, предварительно диспергировать ультразвуком раствор дубящих веществ (таннидов), то продолжительность дубления сокращается на 25—30%. Однако при облучении ультразвуком самого процесса дубления время сокращается вдвое; поэтому ясно, что приведенное выше объяснение не исчерпывает полной картины действия ультразвука. Очевидно, ультразвуковые волны ускоряют и самый процесс диффузии.

Вероятным, хотя и не доказанным пока объяснением является уже известное нам нарушение пограничного слоя, приводящее к тому, что примыкающий к изделию слой жидкости, обедненный в результате ухода рабочего вещества, гораздо быстрее заменяется свежим. Как мы уже знаем, такой быстрый обмен не может быть достигнут простым механическим перемешиванием, и поэтому применение ультразвука дает заметное ускорение процесса.

Ультразвук способствует также и интенсификации процесса окрашивания. Так, например, крашение вискозной ткани ускоряется на 30—40%.

Кроме ускорения процесса, частицы красителя глубже проникают в ткань и прочнее на нее садятся. Окраска при этом получается более равномерной, что увеличивает выход ткани более высоких сортов. Под действием ультразвука окрашиваются даже такие трудно окрашиваемые другими способами синтетические волокна, как нейлон, капрон и др.

Процесс цементации стали, т. е. процесс насыщения ее поверхностного слоя углеродом (для повышения твердости и износоустойчивости), тоже является, по существу, процессом диффузии углерода из раствора в металл. Не удивительно поэтому, что и он существенно ускоряется в поле ультразвука; цементированный слой при этом получается более равномерным. Аналогичным образом ультразвук ускоряет и другие процессы насыщения поверхностных слоев металлов, как например нитрирование стали, цианирование и т. д.

Под действием ультразвука ускоряются не только процессы пропитывания, но и обратные им процессы экстрагирования, т. е. извлечения какого-либо вещества в раствор. Примером подобного процесса является практикуемое сейчас в пивоваренной промышленности ФРГ ускорение экстрагирования из хмеля так называемых



Рис. 78. Ультразвуковая отмывка ткани:
а — загрязненный образец; б — образец после 3-часового кипячения в моющем растворе; в — образец после 10-минутной обработки ультразвуком в том же растворе при комнатной температуре

горьких и ароматических веществ. Под действием ультразвука удается извлечь большее количество этих веществ и тем самым сэкономить до 30% хмеля, являющегося наиболее дорогостоящим сырьем в пивоваренном производстве. Оказалось удобным вести процесс в два приема. Сначала экстрагирование проводят при 20°. При этом удается извлечь практически все ароматические эфирные масла, разлагающиеся при повышенных температурах; во время этой операции таннин и горькие вещества не переходят в раствор. Затем проводится второе экстрагирование при температуре около 100°, при котором извлекается 75% горьких веществ и весь таннин, который под действием ультразвука окисляется. Добавляя к пиву первый и второй экстракты в определенных пропорциях, удается получить пиво великолепного вкуса и запаха при существенной экономии хмеля. Кроме того, такое «ультразвуковое» пиво переносит хранение гораздо лучше обычного.

Под действием ультразвука ускоряется также процесс мойки ткани. Здесь, по-видимому, наряду с ускорением диффузионных процессов существенную роль играет и механическое воздействие, вызываемое кавитацией. На рис. 78 показаны три образца ткани, загрязненной стан-

дартной смесью сажи, жира и других веществ. Два образца подвергали затем очистке: один (рис. 78, *б*) кипятили в течение 3 час. в моющем растворе мыла и соды, а другой (рис. 78, *в*) облучали ультразвуком в таком же растворе в течение 10 мин.

В поле ультразвука заметно ускоряются процессы фотографической обработки: проявление, фиксирование, отмывка и др.

Широкая распространенность диффузионных процессов в промышленности и значительный эффект воздействия ультразвука создают благоприятные предпосылки для развития этой отрасли ультразвуковой технологии.

Ультразвуковая очистка деталей

Разрушая поверхность погруженного в жидкость твердого тела, кавитационные пузырьки прежде всего удаляют находящиеся на ней посторонние пленки и загрязнения. На этом основана ультразвуковая очистка деталей — направление, получившее уже сейчас очень широкое промышленное применение. Для того чтобы разобраться в этом процессе, рассмотрим, как происходит чисто механическое удаление загрязняющих пленок, имеющее место тогда, когда жидкость, в которой идет процесс, никак сама по себе химически не реагирует с материалом загрязнения, например удаление остатков шлифовальной пасты в водной среде.

В этом случае основную роль играют уже известные нам кавитационные пузырьки, которые своими ударными волнами разрушают и срывают пленки загрязнения. Это хорошо видно на рис. 79, на котором изображены последовательные фазы захлопывания пузырька у поверхности стеклянной пластинки с нанесенной на нее пленкой. Приведенные снимки получены в Акустическом институте Академии наук СССР при помощи скоростной киносъемки, и интервал времени между ними составляет около 1/1500 сек. На первом и втором кадрах, пока еще пузырек жив — слой цел. На третьем кадре видны остатки захлопывающегося пузырька и большая трещина в форме окружности. Наконец, на четвертом кадре пленка на участке, ограниченном

трещиной, вырвана и унесена, и видно темное пятно, соответствующее очищенной части поверхности. Однако роль кавитационных пузырьков не ограничивается описанным выше «взрывным» разрушением. После взрыва небольшие пузырьки проникают между пленкой и основным материалом и, колеблясь, отслаивают куски пленки, очищая таким образом поверхность. Это хорошо видно на рис. 80, на котором приведены два кадра, снятых через промежутки времени около 1,50 сек. На верхнем кадре виден пузырек, сидящий у края куска пленки, оставшийся в правой

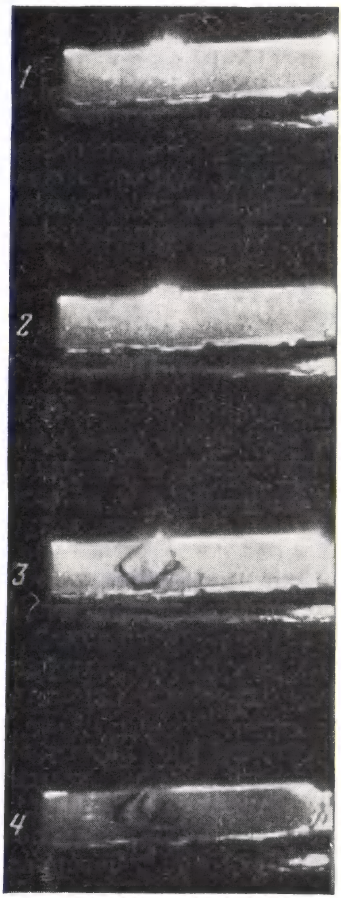


Рис. 79. Разрушение пленки загрязнения ударной волной, образующейся при захлопывании кавитационного пузырька

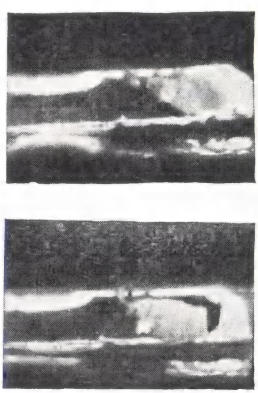


Рис. 80. Колеблющиеся пузырьки отслаивают пленку загрязнения

части пластинки и готовящийся «нырнуть» под пленку. В результате его «подрывной» деятельности сначала

образуется трещина, а затем весь кусок срывается со своего места и уносится звуковым ветром (нижний кадр). Более детальное исследование показывает, что разрушения взрывного типа происходят не слишком часто, и поэтому основная часть загрязнения удаляется путем отслаивания.

Однако роль взрывных разрушений велика: они ускоряют процесс отслаивания, создавая большое количество трещин и задиров пленки и этим открывая путь большой армии пузырьков, удаляющих загрязнение путем отслаивания.

Скорость ультразвуковой очистки и ее качество могут быть значительно повышены, если наряду с описанным чисто механическим действием кавитационных пузырьков использовать еще и ускоряющее влияние ультразвука на процессы растворения. Дело в том, что скорость процесса растворения ограничивается наличием уже известного нам пограничного слоя. В самом деле, слой жидкости, прилегающей к растворяемому веществу, например к куску сахара, находящемуся в стакане чая, очень быстро насыщается, и растворение начинает замедляться. Оно не прекращается только потому, что сладкий чай тяжелее и постепенно оседает на дно стакана, открывая доступ к поверхности сахара.

Процесс удаления насыщенного слоя с поверхности, а значит, и процесс растворения, может быть существенно ускорен в результате размешивания чая ложечкой. Но мы уже знаем, что самым мощным средством для удаления поверхностного слоя являются ультразвуковые колебания. Поэтому ультразвук значительно ускоряет все процессы растворения, в том числе и те виды очистки, которые базируются на химическом растворении загрязняющего слоя специально подобранными растворителями. Сюда относятся не только очистки в буквальном смысле, но и обезжиривание, снятие окалины, удаление флюсов и ржавчины и т. д. Нужно еще учесть, что, ускоряя растворение, ультразвук одновременно оказывает и энергичное чисто механическое воздействие, в результате чего очистка в целом ускоряется в несколько раз.

Большим преимуществом ультразвуковой очистки является ее очень высокое качество: специальные исследования показали, что количество остаточных загрязнений

после ультразвуковой очистки гораздо меньше, чем после какого-либо другого метода очистки.

Ультразвук позволяет решить одну из самых трудных задач — очистку небольших деталей сложной формы, которые с большим трудом поддаются очистке другими способами. В качестве примера можно привести детали часовых механизмов — шестеренки, трибки, подшипники (камни), детали точного приборостроения, детали электровакуумной аппаратуры и т. д. Очистка часовых деталей имеет не меньшее значение, чем точность их изготовления: действующие в часовых механизмах моменты сил столь незначительны (0,1 *г/мм*), что малейшая пылинка может повлиять на точность хода или даже вызвать остановку часов. Очистка часовых деталей является чрезвычайно трудоемкой ручной операцией. Применение ультразвука позволило механизировать эту сложную операцию, перевести детали на массовую обработку и довести качество очистки до нужной степени. Сейчас созданы специальные целиком автоматизированные установки, в которых грязные детали очищаются в ультразвуковых ваннах, прополаскиваются чистым растворителем и сушатся в инфракрасных лучах. Внешний вид одной из таких установок показан на рис. 81.

В последнее время ультразвуковую очистку применяют и для более крупных деталей, степень чистоты которых имеет решающее значение для надежности работы аппаратуры. Сейчас, например, при помощи ультразвука чистят различные детали и узлы радиотехнической аппаратуры, такие, как реле, блоки печатных схем, смонтированную арматуру электровакуумных приборов; детали и части оптических приборов — небольшие линзы, призмы и многое другое.

Ультразвуковая очистка экономит рабочую силу, снижает себестоимость и повышает качество очистки. Получаемая экономия настолько значительна, что применение ультразвука оказывается рентабельным не только при очистке дорогих и трудоемких деталей сложной формы, как еще совсем недавно было принято считать, но и для обработки гораздо более дешевых деталей простой формы, как, например, стеклянной посуды для парфюмерных изделий.

Ультразвук позволяет быстро и надежно очищать, например, маленькие стеклянные баночки от жира, грязи

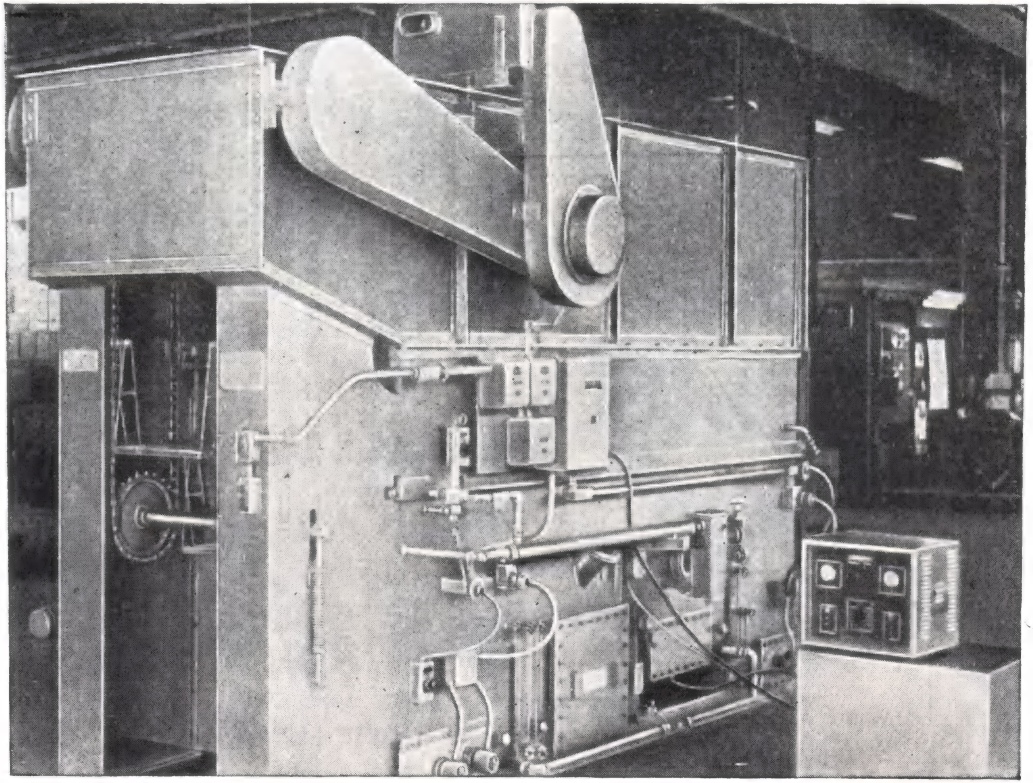


Рис. 81. Автоматизированная установка для ультразвуковой очистки

и пыли, пользуясь только теплой водой. На рис. 82 показана схема установки для очистки стеклянных баночек от крема и т. п., разработанная Центральным конструкторским бюро «Продмаш» и установленная на Московской парфюмерной фабрике «Свобода». Как видно из

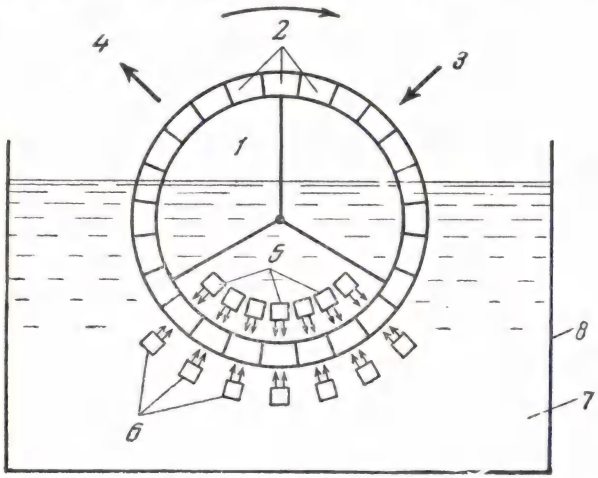


Рис. 82. Схема установки для очистки стеклянной тары:

1 — вращающийся барабан; 2 — гнезда для посуды; 3 — место загрузки; 4 — место выгрузки; 5 — излучатели верхнего ряда; 6 — излучатели нижнего ряда; 7 — вода; 8 — ванна

схемы, баночки загружаются в специальные гнезда, находящиеся по окружности вращающегося барабана, и затем проходят по «коридору», образованному двумя рядами магнитострикционных излучателей, работающих на частоте 21 *кгц*. Достаточно одного прохода через ванну, чтобы самая грязная банка полностью очистилась. Так как барабан делает один оборот в минуту и имеет 30 гнезд, то производительность установки достигает свыше 1500 штук в час, или свыше 12 000 банок в смену. Установка имеет 16 излучателей, каждый из которых излучает около 1 *квт* ультразвуковой энергии. Так как кпд магнитострикционных излучателей составляет около 50%, то для питания всей установки используется ламповый генератор мощностью 32 *квт*. Для обслуживания установки

требуется всего два человека. После ее запуска производительность труда одного рабочего возросла по сравнению с применявшейся ранее ручной мойкой в среднем в 5 раз при снижении производственного брака до нуля.

В последнее время ультразвук начал широко применяться для мойки и стерилизации медицинской и, в частности, хирургической аппаратуры, в первую очередь полых игл для шприцев.

Ультразвуковая пайка и лужение

Кавитационная эрозия и отслаивающее действие пузырьков применяются также и для ультразвуковой пайки алюминия и его сплавов. Как известно, алюминий очень трудно поддается пайке обычными методами. На воздухе алюминий мгновенно окисляется, покрываясь химически очень стойкой пленкой окиси, которая препятствует смачиванию поверхности металла жидким припоем. Ультразвук дает возможность сорвать эту пленку и сделать поверхность алюминия доступной для припоя.

Схема действия такого паяльника показана на рис. 83. К задней стороне обычной головки паяльника *1*, на которую наложена нагревательная обмотка *2*, приставляется магнитострикционный излучатель *3*. Этот излучатель представляет собой пакет никелевых пластин с обмоткой *4*, которая питается от генератора ультразвуковой частоты *5*. Частоты применяемого ультразвука лежат в пределах 20—30 *кгц*. Генерируемые этим пакетом ультразвуковые колебания распространяются по головке паяльника и доходят до ее жала *6*, погруженного в капельку расплавленного припоя *7*. Под действием ультразвука в припое возникают кавитационные пузырьки *8*. Развивающееся при их захлопывании давление разрушает пленку окиси *9* и обнажает чистую поверхность алюминиевой пластины *10*, которая смачивается припоем. Количество энергии, необходимой для создания ультразвука в таком паяльнике, не превышает количества энергии, расходуемой на его нагрев, и, таким образом, стоимость пайки алюминия лишь немного превышает стоимость пайки других металлов.

Иногда оказывается более удобным тепло к месту спая подводить обычным паяльником, а ультразвук — вибратором, не применяя комбинированного паяльника.

Аналогичным способом можно и лудить алюминий. Для этого в лудильной ванне, в которой находится расплавленный припой, возбуждаются ультразвуковые колебания. В расплавленном припое возникает кавитация, которая сбивает пленку окисла с погруженной в ванну

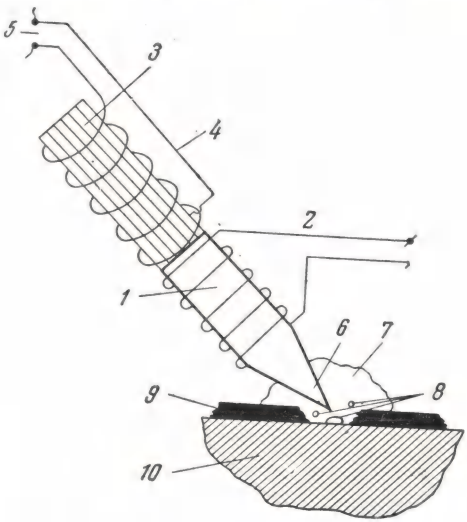


Рис. 83. Схема ультразвукового паяльника

детали; очищенная таким образом поверхность алюминия входит в соприкосновение с расплавленным припоем и облуживается. Такую луженую деталь можно дальше паять обычным паяльником. Для лужения наиболее подходящей является частота 20—30 *кгц*. Это обстоятельство, а также то, что при паянии развиваются сравнительно высокие температуры, объясняют, почему в качестве вибраторов в паяльниках и лудильных ваннах чаще всего применяются магнитострикционные излучатели.

Область применения ультразвуковой пайки и лужения все время расширяется. Сейчас уже, например, применяют ультразвук для бесфлюсового лужения медных выводных концов радиотехнических деталей — сопротивлений, конденсаторов и др. Такое лужение надежнее обычного, так как остатки флюса могут явиться источником

коррозионных процессов, нарушающих надежность контакта.

В последнее время были сделаны удачные попытки ультразвукового лужения поверхности керамики и стекла.

На рис. 84 показан внешний вид ультразвукового паяльника, на рис. 85 — лудильная ванна.

Ультразвук в металлургии

Ультразвук влияет также на ход кристаллизации. По-видимому, перемешивание жидкости, вызываемое ультразвуком, и удары кавитационных пузырьков создают условия, при которых рост больших кристаллов в процессе кристаллизации сильно затруднен или невозможен.

Здесь можно представить себе два независимых механизма, лежащих в основе этого явления: увеличение количества центров кристаллизации и механическое разрушение кристаллов большого размера. Какой из этих двух механизмов является основным — пока трудно сказать; опыты последних лет говорят о том, что преобладает как будто бы рост количества центров кристаллизации в результате облучения ультразвуком.

С другой стороны, любопытно отметить полученные недавно результаты по исследованию ультразвукового облучения на процесс предотвращения кристаллизации пчелиного меда. Известно, что при длительном хранении мед кристаллизуется; внешне это выражается в потере оптической прозрачности и резком увеличении вязкости. Оказывается, что если мед предварительно подвергнуть облучению звуком частотою 9 *кгц* в течение 15—30 мин., то он совершенно не кристаллизуется. Таким образом, здесь (как, впрочем, и в некоторых других, уже рассмотренных случаях) мы сталкиваемся с противоположными результатами облучения ультразвуком.

В последнее время сделан ряд удачных попыток практически применить ультразвук для получения мелкокристаллических структур, что особенно важно в металлургии. Дело в том, что крупнокристаллическая структура отлитого металла понижает его механические свойства, в частности пластичность и деформируемость. Поэтому в

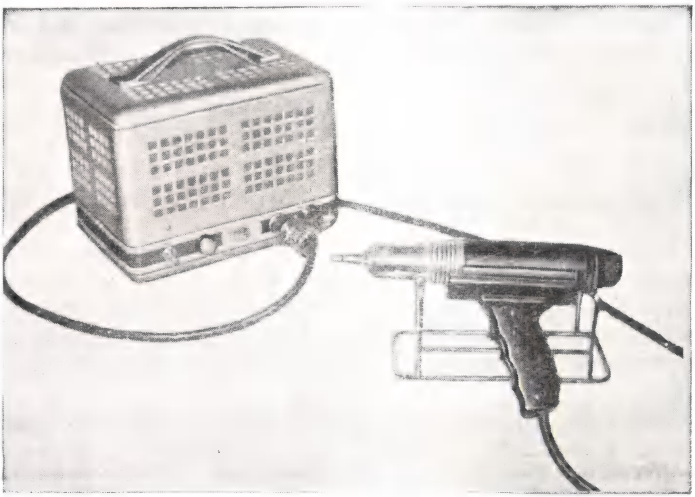


Рис. 84. Ультразвуковй паяльник

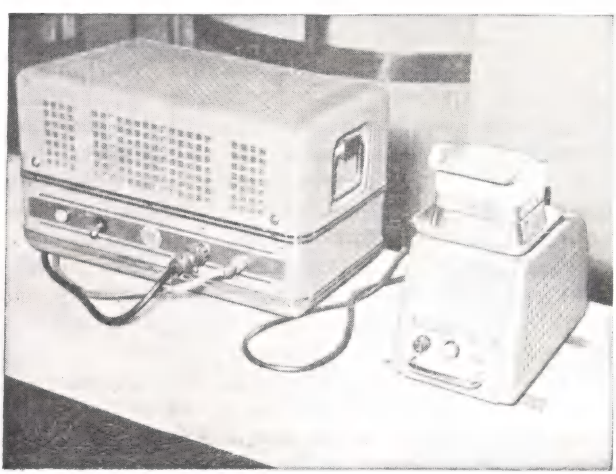


Рис. 85. Ультразвуковая лудильная ванна

металлургии стараются получить отливки с мелкокристаллической структурой.

Одним из возможных способов решения этой задачи является наложение ультразвукового поля во время застывания расплавленного металла в форме или в тигле.

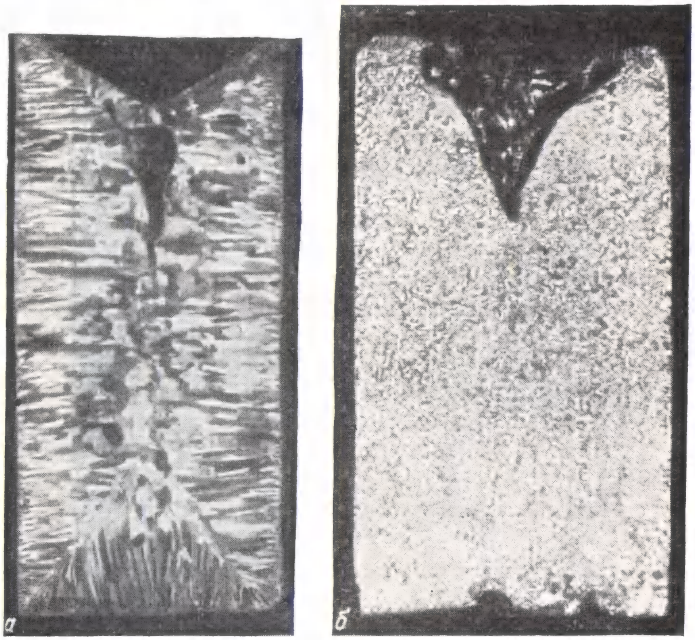
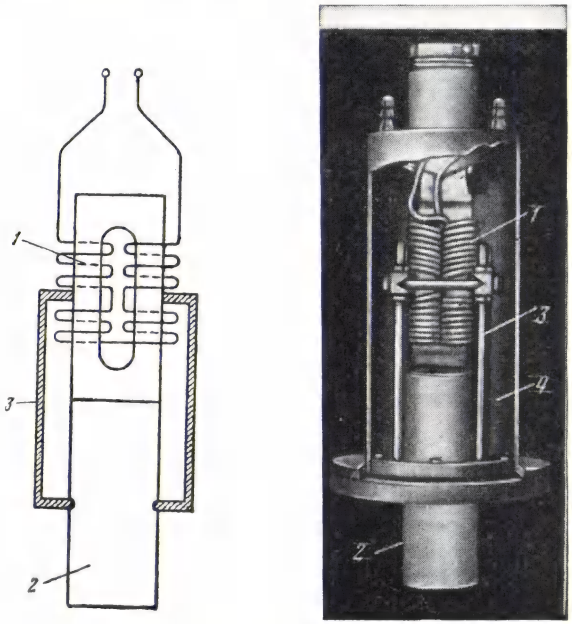


Рис. 86. Шлифы отливки хромистого сплава:
а — обычная отливка; видны крупные кристаллы; б — отливка, застывшая под действием ультразвука; видна равномерная мелкокристаллическая структура

На рис. 86 показан шлиф отливки хромистого сплава Х-27. Температура его плавления около 1500°. На рис. 86, *а* ясно видна его грубая крупнокристаллическая структура. Сплав такой структуры обладает малой пластичностью и малой ударной вязкостью. На рис. 86, *б* показан шлиф того же сплава, облученного мощным ультразвуком в процессе застывания. Структура стала очень мелкой [1].

[1] Приведенные здесь результаты заимствованы из работ ЦНИИЧЕРМЕТа.

Измерения показывают, что эти изменения структуры приводят к увеличению ударной вязкости приблизительно в 2,5 раза и улучшению деформируемости, например при прокате, в 3—4 раза. Так же как и при дегазации расплавленной массы металла, некоторое затруднение вызывает



а *б*

Рис. 87. Приспособление для введения ультразвука в расплав, находящийся при высокой температуре:

а — схема; б — внешний вид.

а — схема; б — внешний вид: *1* — магнитострикционный вибратор с обмоткой; *2* — стержень из жароупорного материала; *3* — стяжка, плотно прижимающая торец стержня к торцу вибратора; *4* — кожух, внутри которого циркулирует охлаждающая вода

сам процесс введения мощного ультразвука в расплав жидкого металла.

На рис. 87 показано одно из возможных решений этой задачи.

При применении показанной конструкции торец жароупорочного стержня *2* все же немного разрушается ударами кавитационных пузырьков, и его материал в неболь-

шом количестве примешивается к расплавленному металлу. Это обстоятельство, как указывают некоторые авторы, может быть использовано для легирования металла материалом стержня. Так, например, при плавке алюминия его можно этим способом легировать титаном.

Вследствие трудности введения ультразвука, а также необходимости получения ультразвуков сравнительно большой мощности, описанный выше метод улучшения кристаллической структуры сплавов применяется пока в небольших масштабах.

Ультразвуковое облучение расплавленных металлов вообще является фактором, существенно улучшающим их качество. Кроме получения однородной, мелкокристаллической структуры и устранения раковин, о чем подробно говорилось выше, ультразвук повышает удельный вес материала отливки, что свидетельствует о большей компактности структуры и, следовательно, о повышении ее прочностных свойств.

Ультразвук влияет также и на процесс старения металлических отливок. После облучения слитка старение несколько ускоряется. Причины, вызывающие это ускорение, пока еще не ясны.

Резание твердых и хрупких материалов

Чрезвычайно интересным применением ультразвука, уже получившим распространение в промышленности, является обработка таких хрупких твердых материалов, как стекло, фарфор, керамика. При этом процесс обработки в известной степени напоминает действие отбойного молотка. К магнитострикционному излучателю (рис. 88) через суживающийся концентратор ультразвука приставляется миниатюрное долото (пуансон) с профилем, соответствующим профилю того отверстия, которое нужно получить. Обрабатываемая поверхность материала смачивается эмульсией абразивного порошка в воде или в масле. Когда торец долота подводится к обрабатываемой поверхности, находящиеся между ним и поверхностью частицы абразива ударяют обрабатываемый материал и выкалывают из него миниатюрные пылинки.

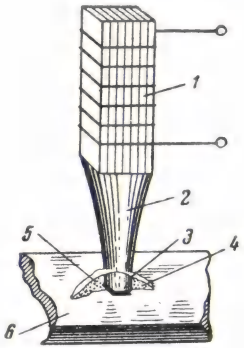


Рис. 88. Схема ультразвуковой обработки твердых материалов:

1 — магнитострикционный вибратор; 2 — концентратор; 3 — инструмент; 4 — абразивная суспензия; 5 — частицы абразива; 6 — обрабатываемый материал

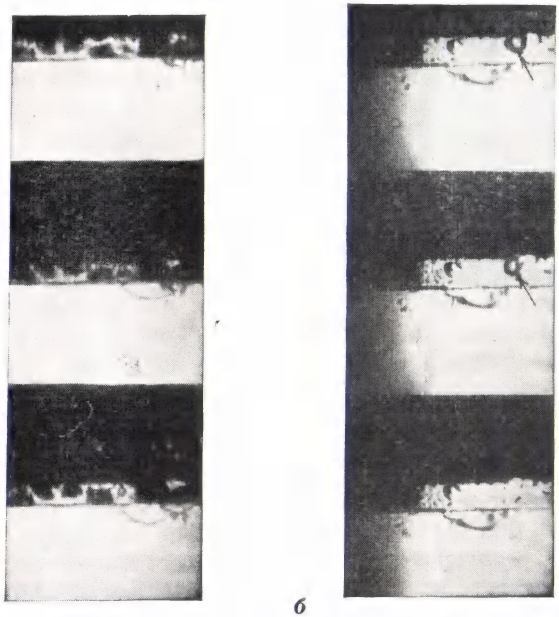


Рис. 89. Кадры скоростной киносъемки ультразвуковой обработки:

а — образование трещины в стекле в результате прямого удара по абразивной частице; б — луночка в инструменте, образовавшаяся в результате многократных захлопываний кавитационного пузырька

До самого последнего времени физика процесса разрушения была неясна, несмотря на то, что этот процесс уже получил сравнительно широкое распространение. В частности, оставалось неизвестным, под действием какого именно физического фактора частицы абразива получают столь значительные ускорения. Существовал лишь ряд разнообразных гипотез; в качестве возможных причин, вызывающих удары абразива об обрабатываемую поверхность, называли: ударные волны, образующиеся при захлопывании кавитационных пузырьков, переменное звуковое давление, звуковой ветер, непосредственные удары торца инструмента по абразивным частицам и т. д. Трудность уяснения этого вопроса усугублялась тем обстоятельством, что обработка происходит в очень узком зазоре между инструментом и обрабатываемым изделием, заполненным непрозрачной для света абразивной суспензией. Лишь применив специальную экспериментальную установку в Лаборатории ультразвука Акустического института АН СССР, удалось произвести в этом зазоре скоростную киносъемку с частотою до 50 000 кадров/сек. Эта съемка показала, что, хотя частицы абразива и могут получать ускорения в результате всех перечисленных причин, разрушение материала получается лишь в случае прямого удара инструмента по частице, лежащей непосредственно на обрабатываемой поверхности.

Так, на рис. 89, *а* показаны последовательные кадры такого удара; на верхнем — обрабатываемый материал (стекло) цел, на нижнем — уже появился выкол. Если абразивная частица получает удар в результате захлопывания кавитационного пузырька, то даже в том случае, когда пузырек захлопывается, поблизости от нее никаких разрушений не возникает. Однако ударные волны, создаваемые кавитацией, могут сами быть причиной разрушения материала. Так как кавитационные пузырьки имеют тенденцию многократно образовываться и захлопываться в одном и том же месте, например в каком-либо микроуглублении на торце инструмента (рис. 89, *б*), то после нескольких десятков захлопываний в этом месте образуется луночка. Нарушения же гладкой поверхности инструмента ухудшают чистоту обрабатываемой поверхности.

Хотя размеры каждой выкалываемой частички материала очень малы, но большое количество работающих

абразивных частиц и очень высокая частота ударов (20—30 000 в секунду) обусловливают довольно быстрое разрушение. Так, например, отверстие диаметром 6 *мм* в стекле проходит на глубину 6 *мм* меньше, чем за 1 мин. Как видно из описания принципа ультразвукового резания,

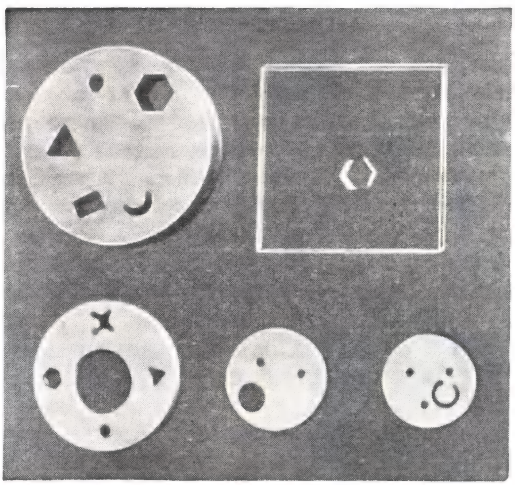


Рис. 90. Образцы фигурных отверстий в керамике и в стекле

в процессе не применяется никаких вращательных движений инструмента или изделия. Поэтому форма вырезанных отверстий не ограничивается только круглыми, как это имеет место в обычных сверлильных или токарных станках. Ультразвуковым способом можно получать отверстия любого, самого сложного контура, повторяющего форму инструмента; некоторые образцы сверлений показаны на рис. 90.

Перечень материалов, которые могут быть обработаны при помощи ультразвука, кроме названных, включает также драгоценные камни, кварц, сверхтвердые сплавы, минерально-керамические резцы и карбид вольфрама, т. е. материалы, обладающие большой хрупкостью. Вязкие материалы не могут быть обработаны этим способом.

В качестве абразива используется корунд или карбид бора. В случае применения абразива более крупного размера процесс идет быстрее; с мелким абразивом скорость обработки падает, зато улучшается чистота поверхности. При применении достаточно мелкого абразива среднеквадратичная неровность (мера шероховатости поверхности) получается 0,25 *мк*.

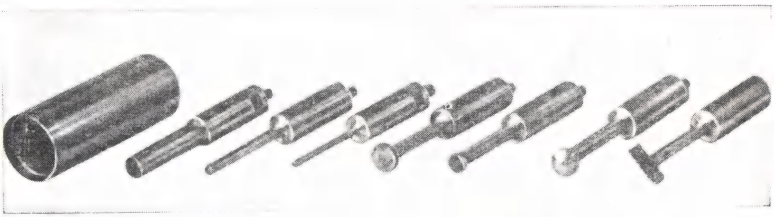


Рис. 91. Набор ступенчатых концентраторов с инструментами разной формы

В процессе работы абразивные частицы наносят удары не только обрабатываемому материалу, но и инструменту. Для уменьшения срабатывания последнего, его делают из вязкого материала, в котором частицы абразива «увязают», нанося минимальные разрушения. Несмотря на эту предосторожность, инструмент все-таки частично срабатывается и тем больше, чем больше время обработки. Так, если для легко обрабатываемых материалов, как стекло, германий, кремний, износ инструмента составляет 1—2% от глубины пройденного отверстия, то для сверхтвердых сплавов он равен 100—200%, а для алмаза доходит до 2000%. Обычно инструмент изготовляют из таких вязких материалов, как нержавеющая сталь, холоднокатаная незакаленная инструментальная сталь, монель, латунь и т. д. Часто инструмент составляет одно целое с концентратором. На рис. 91 показан набор ступенчатых концентраторов с различными инструментами.

Выпускаемые в настоящее время станки работают в диапазоне частот 20—30 000 *гц* и имеют амплитуду колебаний торца инструмента 50—70 *мк*. Подача абразивной суспензии осуществляется специальной механической помпой.

Мощности маленьких настольных станков составляют 50—300 *вт*, в больших они доходят до 2—3 *квт*. Для

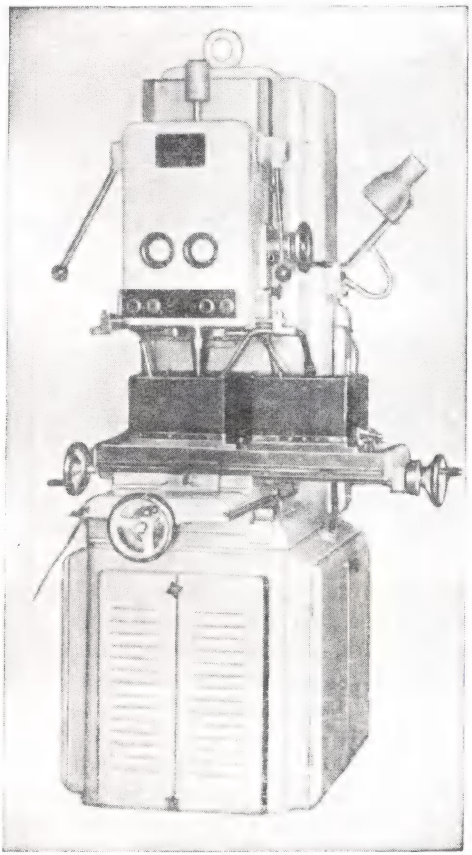


Рис. 92. Мощный станок для ультразвуковой обработки

питания магнитострикционного вибратора станок снабжается специальным ламповым генератором. На рис. 92 показан внешний вид мощного ультразвукового станка (генератор не виден).

Большим преимуществом ультразвукового метода является то, что в отличие от всех существующих методов обработки (кроме электроэрозионного), обрабатываемый материал не подвергается ни механическим усилиям, ни температурным деформациям и поэтому полностью сохраняет свою первоначальную структуру.

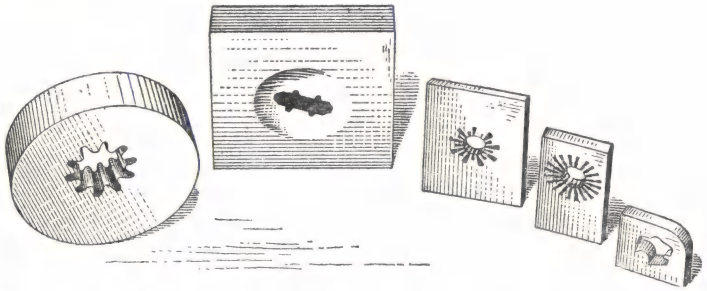


Рис. 93. Образцы матриц и фильер из сверхтвердых сплавов, изготовленные ультразвуковым методом

Наиболее эффективным является применение этого метода обработки для придания необходимой геометрии режущему инструменту из сверхтвердых сплавов и керамики, для изготовления твердосплавных штампов, для обработки и сверления отверстий в твердых камнях (рубинах, сапфирах, агатах и т. п.), из которых изготовляются подшипники часов и приборов точной механики, для изготовления фильер из твердых сплавов или твердых камней (рис. 93), для резки полупроводниковых материалов — германия и кремния, для обработки и сверления отверстий в ферритах, для изготовления очень точных миниатюрных керамических изоляторов для электровакуумных приборов и т. д.

К числу материалов, которые хорошо обрабатываются ультразвуком, относится также зубная эмаль, обладающая очень большой твердостью. Ультразвук режет ее быстро и значительно менее болезненно, чем обычная бормашина.

В настоящее время сконструирован ряд ультразвуковых бормашин, которые проходят сравнительные испытания. Сложность здесь заключается в том, что испытанию должны подвергаться не только машины, но и ... пациенты,

сейчас пока, разумеется, четвероногие. Дело в том, что необходимо выяснить, не вызывает ли воздействие ультразвуком вредных последствий на оставшуюся после обработки часть зуба. Для того чтобы быть уверенными в полном отсутствии таких последствий, необходимо длительное наблюдение за животными, подвергшимися ультразвуковой обработке зубов, и поэтому вопрос о широком внедрении этого очень заманчивого метода может быть решен лишь по прошествии нескольких лет.

Холодная сварка металлов

Если две тонкие металлические пластинки прижать друг к другу и затем приложить к одной из них высокочастотные колебания, направленные параллельно поверхности соприкосновения, то через короткий промежуток времени образуется прочное соединение. Этот процесс получил название ультразвуковой сварки. Физика этого процесса пока еще не ясна. С одной стороны, от сильного трения удаляются поверхностные окисные пленки, образующиеся на свободной поверхности металла. С другой стороны, это же трение может сильно разогреть поверхностный слой металла и размягчить его, облегчая тем самым соединение. Но если такой разогрев и имеет место, то только вблизи поверхности. Остальная масса свариваемых деталей практически не нагревается. Поэтому ультразвуковую сварку называют холодной.

Можно представить себе, что под одновременным действием двух сил — прижимающей и вибрирующей — одна деталь как бы «втирается» в другую. Косвенным подтверждением такого предположения является то обстоятельство, что свариваемые поверхности не нуждаются в предварительной очистке — они очищаются сами во время притирания перед сваркой. Схема ультразвуковой сварки показана на рис. 94. Свариваемые пластины зажимаются между опорным выступом и рабочим зубом. Последнему при помощи вибратора, снабженного концентратором, сообщается колебательное движение в горизонтальной плоскости. Сварка происходит через несколько секунд. Прочность соединения составляет около 90% прочности свариваемого металла.

Первые же исследования показали, что ультразвуковая сварка обладает многими ценными преимуществами: можно

сваривать различные металлы, которые с большим трудом поддаются обычным методам сварки. Алюминий, медь, латунь, цирконий, платина, титан, ниобий, магний, золото, молибден, никель, нержавеющая сталь и многие другие металлы легко и быстро свариваются как друг с другом, так и с любым другим металлом. Можно сваривать также эти металлы и с кристаллами, например приваривать

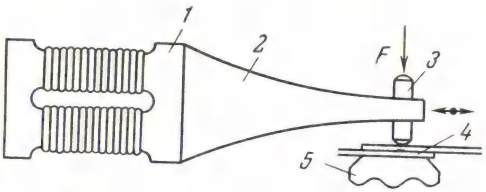


Рис. 94. Схема ультразвуковой точечной сварки:
1 — магнитострикционный вибратор; 2 — концентратор; 3 — рабочий зуб; 4 — опорный выступ; 5 — свариваемые листы

золотые выводы к германиевым и кремниевым полупроводниковым приборам.

Особенно эффективно применение ультразвуковой сварки для соединения тонких и очень тонких полос фольги и проволоки как к тонким, так и к массивным деталям. Последняя операция практически невыполнима обычной тепловой сваркой: либо массивная деталь недостаточно прогревается, либо тонкая сгорает.

На рис. 95 показан станочек для сварки миниатюрных деталей под микроскопом мощностью около 100 *вт*. На рис. 96 показан внешний вид большого станка для ультразвуковой сварки, его мощность — 3 *квт*. Нужно сказать, что ультразвуковая сварка значительно экономичнее, чем, например, электросварка: часто мощность, потребная для ультразвуковой сварки, составляет 5—10% от той мощности, которую нужно было бы затратить, чтобы соединить те же детали электросваркой.

Объясняется это обстоятельство тем, что при электросварке очень много энергии непроизводительно тратится на нагрев большой зоны, прилегающей к сварному соединению. Отсутствие этого нагрева при ультразвуковой сварке, кроме значительной экономии энергии, снимает

вредные остаточные термические напряжения, неизбежно сопутствующие электросварке.

Основным недостатком этого метода сварки является невозможность, при сегодняшнем состоянии ультразвуковой техники, сварки двух массивных деталей; одна из них

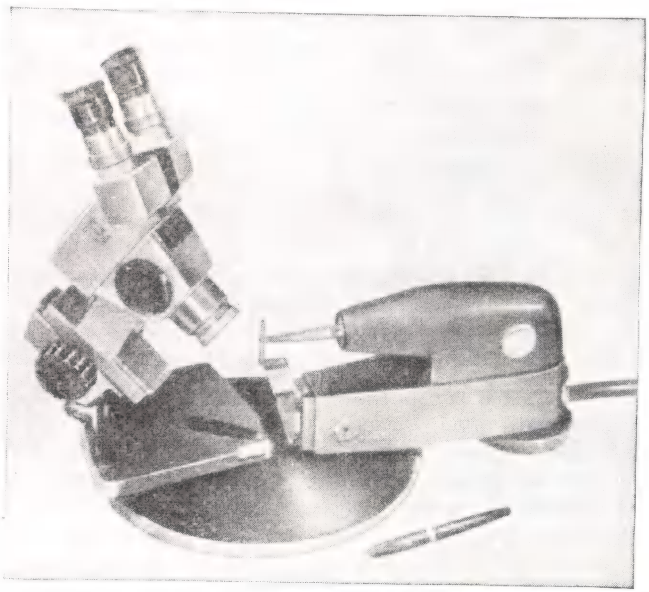


Рис. 95. Станочек для ультразвуковой сварки миниатюрных деталей под микроскопом

должна быть сравнительно тонкой и легкой, чтобы ее можно было раскачать до таких амплитуд вибрации, при которых идет процесс соединения. В настоящее время таким пределом для листовых материалов является толщина в 5—6 *мм*. Второй лист, естественно, может быть какой угодно толщины. Конечно, этот предел не является чем-то принципиальным. Все дело в рациональном выборе схемы подведения вибраций и в разумной конструкции сварочных головок.

Если рабочий зуб и опорный выступ заменить вращающимися роликами, можно осуществить непрерывную шов-

ную сварку. Головка такого станка показана на рис. 97. Непрерывный шов получается также очень прочным и, кроме того, настолько герметичным, что его можно применять для сварки трубопроводов, сосудов сложной формы и т. д. На рис. 98 показаны сваренные при помощи

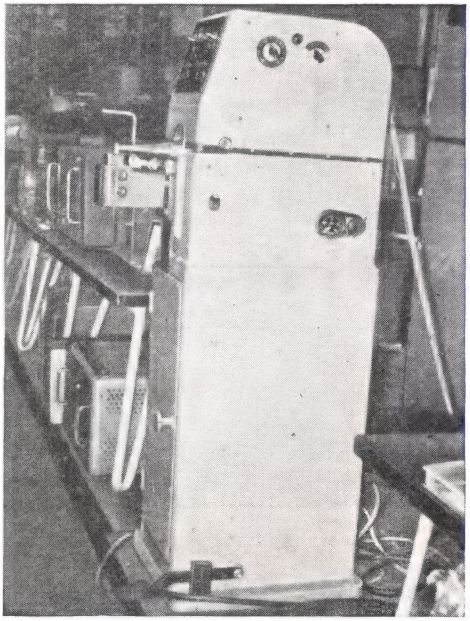


Рис. 96. Большой сварочный станок

ультразвука детали теплообменников, выполненные из алюминия. Толщина стенок трубы и основной плиты—2 *мм*, толщина охлаждающих ребер — 0,2 *мм*. Скорость непрерывной сварки может быть доведена до 4 *м/мин*.

Перспективы развития ультразвуковой технологии

Применение ультразвука может улучшить и ускорить ряд технологических процессов. Вместе с тем нельзя не отметить, что в настоящее время практическое внедрение

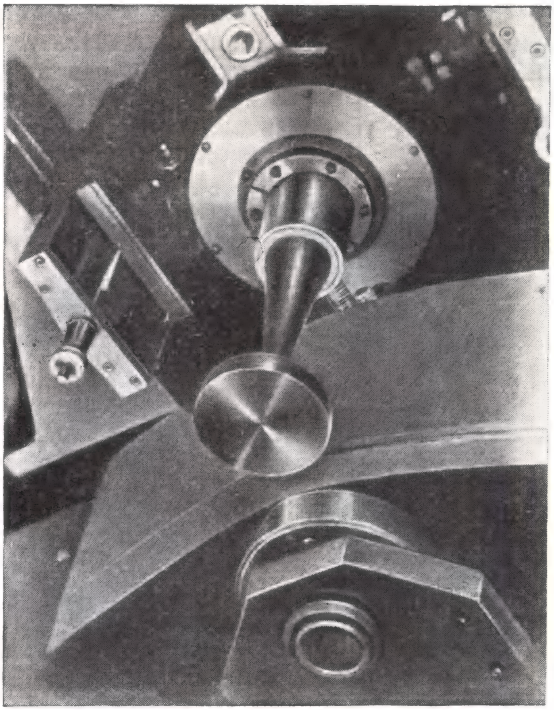


Рис. 97. Головка для непрерывной шовной сварки

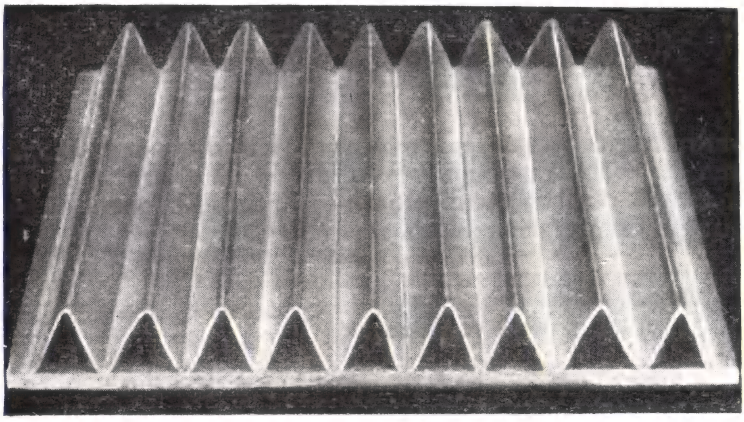


Рис. 98. Образцы сваренных ультразвуком деталей из тонкого алюминиевого листа

методов ультразвуковой технологии выглядит гораздо скромнее, чем это можно было бы ожидать; ряд применений, уже подготовленных в стенах лабораторий, еще не дошел до производственных цехов. Чем же можно объяснить такой разрыв?

Дело в том, что для решения вопроса промышленного применения всегда существенную роль играют вопросы экономики и простоты эксплуатации предлагаемой аппаратуры. Нужно сказать, что далеко не все опытные ультразвуковые технологические установки доведены до той степени простоты и надежности, которая позволила бы рекомендовать их для применения в цехах. Здесь инженерам и конструкторам еще предстоит большая работа.

В особенности упомянутые выше соображения относятся к ультразвуковым генераторам, являющимся сердцем каждой промышленной установки. Сегодня мы умеем при помощи сирен и свистков сравнительно просто и дешево получать ультразвуковые колебания большой мощности в воздухе. Но, как мы могли убедиться, большая часть промышленных применений ультразвука протекает в жидкой фазе или связана с получением вибраций в твердых телах (резание и сварка). Так как звуковая энергия почти целиком отражается от границы раздела между воздухом и жидкостью или воздухом и твердым телом, то ввести дешевую энергию, полученную от ультразвуковой сирены, в твердое тело, или жидкость, со стороны воздуха — невозможно. Нужно получать ультразвук в самой жидкости, в самом твердом теле.

Как мы знаем, эта задача может быть решена либо при помощи жидкостных свистков, либо посредством электромеханических излучателей. Но жидкостные свистки маломощны, а электромеханические излучатели требуют ламповых генераторов и поэтому дóроги и сравнительно сложны в эксплуатации. Поэтому применение ультразвука пока рентабельно для обработки сравнительно дорогостоящих материалов или изделий, когда удорожание, связанное с применением ультразвука, невелико по сравнению с расходами на все изделие в целом.

Так, например, выгодно применять ультразвук для диспергирования дорогостоящих красителей и невыгодно применять его для диспергирования сравнительно дешевого цемента, хотя вторая задача в общем народнохозяйственном

плане несравненно важнее, чем первая. Выгодно чистить ультразвуком мелкие часовые и приборные детали и невыгодно чистить железные крыши, большие стальные листы и корпуса кораблей, хотя качество очистки во всех случаях говорит в пользу применения ультразвука. Здесь следует отметить, что сегодня уже выгодно чистить ультразвуком очень дешевые стеклянные и фарфоровые баночки, что вчера еще казалось совершенно неразумным.

Последний пример убеждает нас в том, что по мере развития науки об ультразвуке и технической ультраакустики, генераторы и технологическая аппаратура непрерывно упрощаются и удешевляются, а ультразвуковая энергия находит все более и более широкое применение.

Так, получение ультразвуковых эмульсий оказалось рентабельным после того, как был изобретен жидкостный свисток. Существенным фактором, способствовавшим внедрению различных промышленных применений ультразвука, было появление пьезоэлектрической керамики, заменившей дорогой и неудобный в производственном процессе кварц. Можно ожидать, что в ближайшее время получившие такое широкое распространение магнитострикционные излучатели будут изготовляться из простых и дешевых ферритов, а не из дефицитных тонколистовых металлов и сплавов, таких, как никель, пермендюр и т. д.

Сейчас на очереди стоит разработка механического метода генерирования ультразвука в жидкости, который позволил бы получать интенсивности 3—5 *вт/см*^{2} при мощности 1—2 *квт* и кпд 30—50%. В этом направлении уже высказан ряд идей, есть экспериментальные образцы и можно ожидать, что в ближайшие годы такие генераторы появятся. Тогда произойдет очередной скачок в развитии ультразвуковой технологии.

ЛИТЕРАТУРА

Мазон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применения в ультраакустике. М., ИЛ, 1952.

Hueter T., Bolt H. Sonics. New York, 1955.

Бергман Л. Ультразвук. М., ИЛ, 1956.

Matauschek J. Einführung in die Ultraschalltechnik. Berlin, 1957.

Красильников В. А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, в воде и твердых телах, изд. 3. М., Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1960.

Борисов Ю. Я., Макаров Л. О. Энергия ультразвук сегодня и завтра. М., Изд-во АН СССР, 1960.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава I. Неслышимые звуки 5

Ультразвуки 8

Звуковые лучи 11

Интенсивность ультразвуковых волн 15

Эффекты второго порядка 16

Ультразвуковая кавитация 23

Ультразвук в природе 29

Глава II. Получение ультразвука 31

Механические излучатели (свистки, сирены) . . . 31

Электромеханические излучатели 36

Фокусирование ультразвуковых волн 43

Получение очень высоких интенсивностей 47

Концентрация низкочастотных вибраций 52

Обнаружение ультразвуковых волн 53

Глава III. Ультразвук — наблюдатель и контролер . . . 58

Контроль за ходом процессов 59

Измерение скорости потока 63

Регистрация микрометеоров в космическом пространстве 64

Измерение вязкости жидкости 66

Ультразвуковая локация 67

Измерение расстояний и определение смещений 74

Выявление внутренних дефектов 78

Применение ультразвука в медицинской диагностике 85

Глава IV. Ультразвуковые фотографии 90

Световое и звуковое изображение 90

Звуковые линзы 92

Получение звуковых изображений 96

Глава V. Воздействие ультразвука на вещество 107
Очистка газов 108
Ускорение сушки 110
Дегазация жидкостей 113
Получение суспензий и эмульсий 115
Гомогенизация 118
Изготовление аэрозолей 120
Разрушение пограничного слоя 123
Ускорение диффузионных процессов 128
Ультразвуковая очистка деталей 131
Ультразвуковая пайка и лужение 137
Ультразвук в металлургии 139
Резание твердых и хрупких материалов 143
Холодная сварка металлов 150
Перспективы развития ультразвуковой технологии . . . 153
Литература 157

Лаварь Давыдович Ровенберг

Рассказ о неслышимом звуке

*

Утверждено редколлегией
научно-популярной литературы
Академии наук СССР

*

Редактор Издательства *Е. И. Левит*
Художника *И. Юдина*
Технический редактор *Е. В. Макуни*

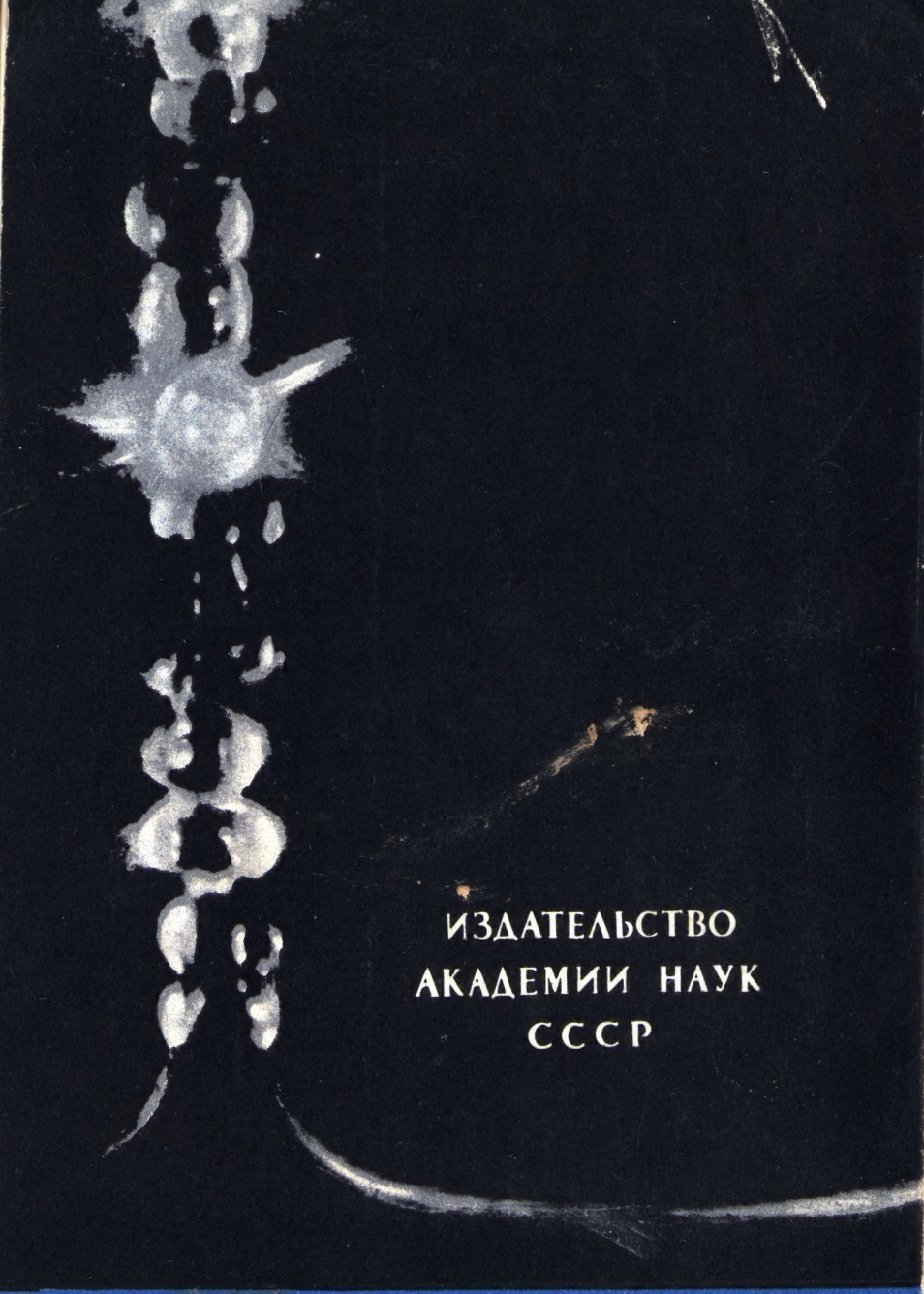
*

РИСО АН СССР № 1253-доп. Сдано в набор 26/VII 1961 г.
Подписано к печати 21/XI 1961 г. Формат 84×108 1/32
Печ. л. 5=8,2 усл. печ. л. 7,5 уч.-изд. л. Тираж 20000 экз.
Т-12081. Изд. № 111. Тип. зак. № 2048

Цена 23 коп.

Издательство Академии наук СССР
Москва, Б-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография Издательства АН СССР,
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10



ИЗДАТЕЛЬСТВО
АКАДЕМИИ НАУК
СССР

Цена 23 коп.